

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“APLICACIÓN DEL REACTIVO FENTON  
PARA LA REMOCIÓN DE DQO  
DEL LIXIVIADO DE UN DEPÓSITO DE SEGURIDAD  
A ESCALA LABORATORIO”**

Presentada por:

**MARÍA DEL ROSARIO ARANIBAR BIANCO**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

Lima – Perú

2016

# ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
	2.1. DEPÓSITO DE SEGURIDAD DE BEFESA PERÚ S.A. ....	3
	2.2. GENERACIÓN DE LIXIVIADO.....	5
	2.3. CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO.....	6
	2.4. ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD.....	8
	2.5. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA.....	8
	2.6. PRINCIPIO QUÍMICO DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA).....	10
	2.7. PROCESO FENTON .....	13
	2.8. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO FENTON .....	14
	2.9. PRUEBA DE JARRAS .....	15
	2.10. TÉCNICAS ESTADÍSTICAS .....	16
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
	3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	18
	3.2. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS .....	18
	3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	18
	3.3.1. Monitoreo preliminar .....	18
	3.3.2. Muestra para los experimentos .....	20
	3.3.3. Población para los experimentos .....	20
	3.3.4. Identificación de variables .....	22
	3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES .....	23
	3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	24
	3.5.1. Caracterización inicial del lixiviado .....	24
	3.5.2. Acidificación de la muestra de lixiviado .....	25
	3.5.3. Determinación de la dosis óptima de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> – corrida 1.....	25
	3.5.4. Dosificación de reactivos .....	26
	3.5.5. Control de temperatura .....	27
	3.5.6. Neutralización de las muestras y verificación de ph .....	27

3.5.7.	Filtración de la muestra neutralizada .....	27
3.5.8.	Determinación de la DQO y concentración de iones .....	27
3.5.9.	Determinación de la relación p/p $\text{Fe}^{2+}$ / $\text{H}_2\text{O}_2$ óptima .....	28
3.5.10.	Determinación de la dosis óptima de $\text{Fe}^{2+}$ - corrida 2 .....	28
3.6.	INSTRUMENTOS DE COLECTA DE DATOS .....	28
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
4.1.	CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL LIXIVIADO .....	31
4.2.	ACIDIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE LIXIVIADO .....	35
4.3.	DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE $\text{H}_2\text{O}_2$ CORRIDA 1 ...	35
4.3.1.	Peso de sulfato de hierro dosificado por jarra .....	35
4.3.2.	Volumen de peróxido de hidrógeno dosificado por jarra .....	36
4.3.3.	Control de temperatura .....	37
4.3.4.	Neutralización de las muestras y verificación de pH.....	39
4.3.5.	Filtración de la muestra neutralizada .....	40
4.3.6.	Determinación de la DQO .....	40
4.3.7.	Análisis estadístico de los resultados de la corrida - 1 .....	42
4.4.	DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE $\text{FeSO}_4$ CORRIDA 2 ..	45
4.4.1.	Peso de sulfato de hierro dosificado por jarra .....	46
4.4.2.	Volumen de peróxido de hidrógeno dosificado por jarra .....	46
4.4.3.	Control de temperatura .....	47
4.4.4.	Neutralización de las muestras y verificación de pH .....	49
4.4.5.	Filtración de la muestra neutralizada .....	50
4.4.6.	Determinación de la DQO .....	51
4.4.7.	Análisis estadístico de los resultados de la corrida - 2 .....	52
4.5.	CROMATOGRAFÍA IÓNICA .....	55
4.5.1.	Muestra de lixiviado pura .....	56
4.5.2.	Muestras producto de la corrida 1, optimización de $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	57
4.5.3.	Muestras producto de la corrida 2, optimización de $\text{FeSO}_4$ .....	59
4.5.4.	Etapas del experimento. Análisis de la evolución de cada ion ..	61
4.6.	CARACTERIZACIÓN FINAL DE LIXIVIADO TRATADO .....	62
4.6.1.	Comparación con el proyecto de DS LMP para	

	infraestructuras de residuos sólidos y la legislación vigente de Chile para emisión a un cuerpo de agua de lixiviados de rellenos de seguridad .....	66
4.6.2.	Comparación con la caracterización inicial. Porcentaje de remoción de contaminantes.....	70
4.6.3.	Comparación con la investigación de Méndez et al. 2010 .....	74
V.	CONCLUSIONES .....	77
VI.	RECOMENDACIONES .....	78
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80
VIII.	ANEXOS .....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización del Lixiviado .....	7
Tabla 2: Resumen de resultados de la prueba preliminar, monitoreo de DQO .....	19
Tabla 3. Manipulación de Variables en el Procesos Experimental .....	22
Tabla 4: Primera corrida de jarras considerando el valor de Sulfato Ferroso fijo para todas las jarras y los valores de Peróxido de Hidrógeno calculados según las relaciones $Fe/H_2O_2$ establecidas.....	26
Tabla 5: Resultados Caracterización Inicial del Lixiviado .....	31
Tabla 6: Resultados Caracterización Inicial del Lixiviado. Metales Totales .....	33
Tabla 7: Peso de $FeSO_4$ para la corrida 1; valor inicial, repetición 1 y repetición 2.....	36
Tabla 8: Volumen y Peso de $H_2O_2$ para la corrida 1.....	37
Tabla 9: Control de temperatura e intervalos de medición corrida 1 .....	38
Tabla 10: Control de pH. Corrida 1 .....	39
Tabla 11: Valores de DQO reportados para la primera corrida. Incluidas Repeticiones ....	41
Tabla 12: Valoraciones descriptivas de $DQO_2$ mg/l, derivadas de las pruebas con diferentes dosis de $H_2O_2$ mg/l.....	43
Tabla 13. Pruebas post hoc DMS. Comparaciones múltiples Variable dependiente: DQO mg/l.....	44
Tabla 14: Peso de $FeSO_4$ para la corrida 2; valor inicial, repetición 1 y repetición 2.....	46

Tabla 15: Volumen y Peso de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> para la corrida 2 .....	47
Tabla 16: Control de temperatura e intervalos de medición. Corrida 2 .....	48
Tabla 17: Control de pH. Corrida 2 .....	50
Tabla 18: Valores de DQO reportados para la segunda corrida. Incluidas Repeticiones ...	51
Tabla 19: Valoraciones descriptivas de DQO <sub>2</sub> mg/l, derivadas de las pruebas con diferentes dosis de FeSO <sub>4</sub> mg/l.....	53
Tabla 20: Pruebas post hoc Tamhane. Comparaciones múltiples Variable dependiente: DQO <sub>2</sub> .....	54
Tabla 21. Resultados cromatografía iónica. Muestra pura .....	56
Tabla 22. Resultados cromatografía iónica. Corrida 1.....	57
Tabla 23. Resultados cromatografía iónica. Corrida 2.....	59
Tabla 24. Resultados cromatografía iónica. Ciclo del Proceso Fenton .....	61
Tabla 25: Resultados Caracterización Final del Lixiviado .....	63
Tabla 26: Resultados Caracterización Final del Lixiviado. Metales Totales.....	64
Tabla 27: Comparación de los resultados del lixiviado tratado con el Proyecto de LMP ..	66
Tabla 28. Comparación del LMP de Chile con el Proyecto DS LMP para efluentes de Infraestructura de Residuos Sólidos de Perú y los resultados de la presente investigación	68
Tabla 29: Comparación de resultados pre y post tratamiento. Eficiencias de remoción.....	70
Tabla 30: Comparación de resultados pre y post tratamiento. Eficiencias de remoción. Metales Totales .....	71
Tabla 31: Comparación de los Resultados Obtenidos con los de la Investigación de Méndez et al .....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Demanda de oxígeno producida por reacción química.....	10
Figura 2: Curva Dosis de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l) & DQO (mg/l).....	42
Figura 3. Representación gráfica de medias de DQO mg/l correspondientes a las diferentes dosis de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> mg/l .....	45
Figura 4: Curva Dosis de FeSO <sub>4</sub> (mg/l) & DQO (mg/l) .....	52
Figura 5: Representación gráfica de medias de DQO mg/l correspondientes a las diferentes dosis de FeSO <sub>4</sub> mg/l .....	55
Figura 6: Variación de iones disueltos. Corrida 1.....	58
Figura 7: Variación de iones disueltos. Corrida 2.....	60

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Informes de Ensayo Certimín.....	82
Anexo 2: Tabla 01. Proyecto de Decreto Supremo Límites Máximos Permisibles para Efluentes de Infraestructuras de Residuos Sólidos. Perú.....	99
Anexo 3: Archivo Fotográfico .....	101
Anexo 4: Legislación Vigente de Chile para el vertimiento de lixiviado de un depósito de seguridad .....	115

## RESUMEN

El reactivo Fenton ofrece una muy buena alternativa para el tratamiento de efluentes con carga orgánica elevada y aunque tiene fama de ser un tratamiento costoso, para el sistema en el que fue aplicado, resulta ser económico y funciona muy bien. La matriz sobre la que se realizó el tratamiento fue el lixiviado de un depósito de seguridad. El objetivo general fue determinar la dosis óptima de reactivo Fenton para la reducción de DQO del lixiviado, y los objetivos específicos; determinar la dosis óptima de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y la dosis óptima de  $\text{Fe}^{2+}$ , para obtener la máxima remoción de DQO. Además, determinar la relación  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$  óptima. Los experimentos se realizaron en dos etapas, la primera para la optimización de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y la segunda para la optimización de  $\text{FeSO}_4$ ; siendo la variable dependiente, en ambos casos, el menor valor de DQO obtenido en las muestras tratadas. Se acidificaron las muestras utilizando residuos ácidos y se dosificaron los reactivos; 24 horas después se neutralizó y filtró la muestra. El producto obtenido se diluyó para analizar la DQO y realizar los análisis de cromatografía iónica. La dosis óptima de reactivo Fenton que generó la mayor reducción de DQO del lixiviado evaluado; es 12000 mg/l de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y 5000 mg/l de  $\text{FeSO}_4$ . La relación óptima de  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  que permitió obtener la mayor remoción de DQO es 0.417. Se evidenció la degradación de la materia orgánica contenida en el lixiviado mediante la reducción de la DQO en 77.79 % y de la DBO en 97.2%; además de altos índices de remoción de metales totales.

**Palabras Clave:** Reactivo Fenton, Dosis Óptima, Reducción de DQO, Cromatografía, Degradación Oxidativa

## ABSTRACT

Fenton reagent offers a very good alternative for the treatment of effluents with high organic load, although it is reputed to be a costly treatment, for the system in which it was applied, it is economical and works very well. The matrix on which the treatment was carried out was the leachate of a security fill. The overall objective was to determine the optimum dose of Fenton reagent for the reduction of COD of the leachate, and as specific targets; determine the optimum dose of  $\text{H}_2\text{O}_2$  and the optimal dose of  $\text{Fe}^{2+}$ , to obtain the maximum removal of COD. In addition, determine the optimum  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{2+}$  ratio. The experiments were carried out in two stages, the first for the optimization of  $\text{H}_2\text{O}_2$  and the second for the optimization of  $\text{FeSO}_4$ ; being the dependent variable, in both cases, the lowest COD value obtained in the treated samples. The samples were acidified using acid residues and the reagents were dosed, 24 hours later the sample was neutralized and filtered. The product obtained was diluted to analyze the COD and perform the ion chromatography analyzes. The optimum dose of Fenton reagent that generated the highest COD reduction of the evaluated leachate; is 12000 mg / l  $\text{H}_2\text{O}_2$  and 5000 mg / l  $\text{FeSO}_4$ . The optimal ratio of  $\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$  that allowed the highest removal of COD was 0.417. The degradation of the organic matter contained in the leachate was evidenced by the reduction of the COD in 77.79% and of the BOD in 97.2%; as well as high rates of total metal removal.

**Keywords:** Fenton Reagent, Optimal Dose, COD Reduction, Chromatography, Oxidative Degradation

## I. INTRODUCCIÓN

El ser humano en su búsqueda de desarrollo personal y social ha ido creando herramientas y procesos tecnológicos que han facilitado su existencia; sin embargo, por muchos años esta búsqueda dejó de lado el control de los efectos negativos que las actividades humanas provocaban al ambiente, teniendo como resultado un severo deterioro de la calidad del agua, del aire y del suelo.

Toda actividad industrial genera impacto ambiental, uno de los aspectos más importantes es la inadecuada disposición final de los residuos peligrosos; debido a que estos son liberados indiscriminadamente al ambiente, ingresados a botaderos informales o llevados a rellenos sanitarios oficiales, pero que no cuentan con espacios adecuados para el tratamiento y la disposición final de los residuos peligrosos. Es en este marco que, en nuestro país, durante la última década, se ha implementado la normativa que exige a las empresas dar disposición final a los residuos peligrosos en un depósito de seguridad.

Los residuos peligrosos tanto sólidos como líquidos después de ser neutralizados e inertizados, ingresan al depósito de seguridad en el que son confinados en un espacio físico impermeabilizado por un tiempo indefinido, sin causar mayor impacto a la salud humana ni al ambiente, garantizando la seguridad ambiental. Sin embargo; los residuos confinados conservan una humedad remanente que al ser compactados generan un lixiviado de alta carga contaminante que se convierte en un pasivo ambiental muy peligroso que debe ser eficazmente tratado para evitar extender los contaminantes a otras fases.

Actualmente, existen alternativas de control de lixiviados, como la recirculación y regado del mismo sobre el vaso de vertido para favorecer su evaporación (Méndez R., Pietrogiovanna J., Santos B., Sauri M., Giacomán G. y Castillo E., 2010); alternativa que

lejos de eliminar el problema, lo mantiene y consume gran cantidad de energía eléctrica permanentemente.

Surge así la necesidad de desarrollar una tecnología de oxidación química severa que remueva los contaminantes contenidos en el lixiviado; y el agua pueda ser dispuesta sin causar mayor impacto al ambiente.

Una propuesta de tratamiento para este tipo de efluentes líquidos es el reactivo Fenton, un proceso eficiente que alcanza muy altos porcentajes de remoción de contaminantes. Según Méndez R. et al. (2010) este proceso ha sido aplicado en lixiviados de 7 distintos rellenos sanitarios alcanzando eficiencias de remoción de DQO de hasta 85%.

La presente tesis tuvo como objetivo general; determinar la dosis óptima de reactivo Fenton para la reducción de DQO del lixiviado generado en el depósito de seguridad de Befesa Perú<sup>1</sup>, y como objetivos específicos determinar la dosis óptima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y la dosis óptima de Fe<sup>2+</sup>, para obtener la máxima remoción de DQO. Además, se determinó la relación H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> que resultó óptima.

A pesar que el proceso Fenton ofrece una muy buena alternativa para el tratamiento de efluentes con alta carga orgánica, presenta dos limitaciones importantes que hacen que el tratamiento sea peligroso y bastante costoso.

En primer lugar, requiere el uso de ácidos fuertes para conseguir las condiciones de pH necesarias para que ocurra la reacción; y, en segundo lugar, después de ocurrida la reacción de oxidación, al neutralizar la muestra tratada, se forma un lodo muy tóxico que debe ser dispuesto como un residuo peligroso. Sin embargo, para el caso aplicado de Befesa Perú, ofrece una excelente alternativa para la eliminación segura y económica de este pasivo ambiental, debido a que esta empresa cuenta con residuos ácidos para disposición final que pueden ser reutilizados en el proceso; además de que el lodo generado puede disponerse seco, directamente en el vaso de vertido. Aspectos que permitieron tomar la decisión de escoger el proceso Fenton de entre los Procesos de Oxidación Química Avanzada.

---

<sup>1</sup> Depósito de Seguridad de Befesa Perú, depósito del que se colectará la muestra de lixiviado a tratar en la presente investigación.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. DEPÓSITO DE SEGURIDAD DE BEFESA PERÚ S.A.**

Befesa Perú es una sociedad anónima pionera en la gestión integral de los residuos peligrosos en el Perú, desde el año 2001, que ha desarrollado una serie de tecnologías para el tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos, cumpliendo estrictamente con los estándares internacionales de gestión de calidad ambiental, lo que les ha permitido mantener, desde el año 2004, la acreditación en las normas; ISO 9 001, ISO 14 001 y OSHA 18 001.

Befesa cuenta con un depósito de seguridad ubicado en el distrito de Chilca provincia de Cañete, región Lima, que tiene un volumen total de confinamiento de desechos de 300 000 m<sup>3</sup>, de los cuales, a la fecha se ha explotado el 40% de la etapa del proyecto en operación.

El depósito de seguridad de Befesa cuenta con un sistema de impermeabilización del vaso de vertido<sup>2</sup> mediante la acción combinada de; una barrera geológica (formado por rocas ígneas, pertenecientes a una secuencia del batolito costanero y depósitos aluviales de formación geológica reciente) y un sistema de impermeabilización artificial en el que se encuentra contenido el sistema de drenaje de lixiviados.

El revestimiento impermeable artificial está formado por una serie de capas de materiales, dispuestas en un orden estratégico en el fondo y los taludes del vaso. En el fondo, sobre el terreno natural refinado compactado se encuentra una capa de material arcilloso, seguida por una capa de bentonita, una lámina impermeable de polietileno de alta

---

<sup>2</sup> Vaso de Vertido, celda, depósito o simplemente vaso hace referencia al espacio físico impermeabilizado en el que se introducen los residuos peligrosos tratados para ser confinados por tiempo indeterminado.

densidad lisa por sus dos caras y geotextil antipunzonamiento. Sobre estas capas se constituye el sistema de drenaje de lixiviado.

La capa de drenaje que cubre el fondo del vaso está constituida por grava de tamaño comprendido entre 20 y 40 mm, de material no calcáreo (para evitar su disolución por los lixiviados) y de bordes redondeados. Su espesor es de 30 cm. La capa de grava está recubierta de un geotextil de filtración de 160 g/m<sup>2</sup>, cuya principal función es evitar la colmatación de los canales de drenaje con residuos sólidos.

En los taludes del interior del vaso cuenta con geotextil antipunzonamiento, una lámina de polietileno de alta densidad con la cara interior provista de spikes y otra lámina de geotextil antipunzonamiento; sobre estas capas se cuenta con una estructura drenante artificial formada por una malla tridimensional de monofilamentos de polietileno de alta densidad. Dicha malla está preformada en una configuración zig-zag, que es óptima para resistir la presión. Esta malla está cubierta por su cara inferior por un geotextil de protección de la lámina de polietileno y por su cara superior de un geotextil de filtración que evite la colmatación de los canales de drenaje.

Este sistema cuenta con una balsa impermeabilizada, con capas similares a lo detallado líneas arriba, en la que se almacena el lixiviado generado por el vaso de vertido, esta balsa se encuentra exterior al sistema de impermeabilización del vaso, solo se comunican a través de una tubería de polietileno de alta densidad soldada por ambos lados, para la descarga del lixiviado. Dentro de esta balsa se cuenta con una bomba sumergible que bombea el lixiviado sobre el vaso de vertido para favorecer su evaporación.

Además existe una torre de captación de lixiviados formada por una arqueta de concreto sobre la que se sitúa una tubería de polietileno de alta densidad de 500 mm de diámetro. A su alrededor se sitúa una tubería perforada de concreto de 1500 mm de diámetro con perforaciones de 5 mm. El espacio entre ambas tuberías está relleno de grava.

Este sistema de drenaje expuesto, cumple también la función de sistema de ventilación, favoreciendo la salida al exterior de los posibles gases que se puedan formar en el depósito.

Toda la estructura de la torre de captación de lixiviados está situada sobre el mismo sistema de impermeabilización del vaso, de tal forma que se asegure la total estanqueidad al evitarse posibles filtraciones a través del concreto. (Befesa Perú S.A., 2001).

## **2.2. GENERACIÓN DE LIXIVIADO**

Un depósito de seguridad es una instalación diseñada para el confinamiento indefinido de desechos peligrosos, que ofrece la máxima garantía de estabilidad y aislamiento de los desechos depositados y que asegura el correcto tratamiento de eliminación de los lixiviados generados. (Pérez, D. 2011).

Se entiende por lixiviado el líquido residual que es generado en la descomposición bioquímica de los residuos o como resultado de la percolación de agua desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos), a través de los residuos en procesos de degradación, extrayendo materiales disueltos o en suspensión. Este líquido tiende a salir por gravedad, por la parte inferior del Relleno Sanitario, hasta que una capa impermeable lo impida. (Guía ambiental. Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002, citado por Mendoza P. y López V. 2004).

Este concepto aplicado a un depósito de seguridad presenta modificaciones, debido a que los residuos que se disponen en este tipo de celdas, no sufren descomposición bioquímica. Según Pérez, D. (2011) en un depósito de seguridad, los factores que gobiernan la formación de lixiviados son los siguientes:

- Precipitaciones
- Escorrentías Superficiales
- Evaporación y Evapotranspiración
- Filtración a través de la Cobertura (etapa de cierre)
- Movimiento del Agua a través de los Residuos

Por lo tanto, se define como lixiviado de un depósito de seguridad; al líquido residual generado por; la percolación de precipitaciones a través de los desechos contenidos en el vaso de vertido y por la pérdida de humedad de los desechos al ser compactados; líquido que se colecta del sistema de drenaje de la instalación y que por sus características nocivas para la salud y el ambiente, debe recibir tratamiento antes de ser dispuesto.

En el depósito de seguridad de Befesa Perú, se generan aproximadamente 3 m<sup>3</sup>/ día de lixiviado que son retenidos en la balsa de captación y periódicamente recirculados (Valor medido por la investigadora en monitoreo previo). El diseño de este depósito cuenta con un sistema de drenaje de aguas pluviales que mediante una cuneta de concreto de sección trapezoidal deriva aguas limpias de precipitación y escorrentía hasta una zona forestada para ser utilizada en riego; además de estar ubicado en una zona geográfica de escasa precipitación.

### **2.3. CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO**

Existe una gran variedad de residuos peligrosos generados por la industria manufacturera, minera, petrolera, del sector salud, etc. que presentan diversas características y niveles de peligrosidad.

Según, Haro R. y Estrada G. (2014), el confinamiento de los residuos peligrosos directamente dispuestos o que han recibido tratamiento antes de ser introducidos al vaso de vertido, generan lixiviados que contienen gran cantidad de contaminantes que de llegar al suelo o al agua subterránea causarían un gran riesgo al medio ambiente.

Debido a las características de los desechos dispuestos en el depósito de seguridad, el lixiviado presenta valores muy altos de DQO, y valores bajos de DBO, presentando un índice de biodegradabilidad muy bajo que hace que la mejor alternativa de tratamiento sea someterlo a oxidación química avanzada. Las características del lixiviado pueden variar (Singh S. y Tang W., 2012) por influencia de factores como; la edad del depósito de seguridad, condiciones del tiempo atmosférico, la composición de los residuos que ingresan al vaso de vertido<sup>3</sup>, el diseño del depósito y la operación diaria del mismo.

---

<sup>3</sup> Residuos ingresados al depósito de Befesa registrados en el mes de Octubre-15. Lodos de salmuera de membrana, lodos de salmuera álcali, lodos con trazas de nitrato de amonio, lodos de ptar industrial, lodos de tierras diatomeas, aceite usado, residuos y suelo contaminado con hidrocarburos, thoner residual, pintura residual, grasa de trampa de cocina, aceite vegetal en desuso, residuos líquidos de laboratorio, reactivos

A continuación, se muestra la tabla 1 en la que se pueden observar los parámetros del lixiviado monitoreados por Befesa el año 2015.

**Tabla 1: Caracterización del lixiviado**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>UNIDAD</b>
DQO	10981.2	mg/l
DBO <sub>5</sub>	61.6	mg/l
Ph	7	unidades de pH
OD	105	mg/l
Plomo	0.116	mg/l
Niquel	2.547	mg/l
Cadmio	2.015	mg/l

FUENTE: Befesa Perú. (2015). Elaboración Propia.

Nótese que la relación DQO/DBO<sub>5</sub> es del orden de 10<sup>2</sup>, lo que indica que no puede ser tratado por medios biológicos.

---

vencidos, productos farmacéuticos vencidos, líquido de gas natural residual, residuos de solventes orgánicos, residuos de ácidos, residuos de aditivos de concreto, refrigerantes usados, residuos de etil mercaptano, aceite residual de glicerina, residuos contaminados con tinta, grumos de tinta, dispersante vencido, residuos de esencias y colorantes de la industria alimentaria, sacos vacíos de soda, membranas saturadas de ósmosis inversa, viruta de cromo, llantas en desuso, madera contaminada, epps usados, filtros usados de vehículos, fluorescentes usados, fibra de vidrio residual, electrodomésticos, equipos e informática y telecomunicaciones, aparatos de alumbrado, empaques de residuos de cianuro, cajas y bolsas de explosivos vacías, calaminas de asbesto, focos usados, cemento vencido, resina de cemento, carbón activado residual, productos cosméticos vencidos, residuos de operación minera.

## **2.4. ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD**

Para diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales, es necesario saber cuánta materia orgánica biodegradable está presente en el efluente, por consiguiente, se necesita determinar la DBO<sub>5</sub>, y la demanda química de oxígeno DQO, de esta forma se obtiene información acerca de la biodegradabilidad de los compuestos orgánicos presentes en el efluente. Así se establece el índice de biodegradabilidad, como la relación entre DQO y DBO<sub>5</sub>, como un parámetro para controlar y operar la planta de tratamiento.

Así se tiene que, Según Cisterna O., Pedro y Peña D. 2011; cuando:

$$(DQO/DBO_5) < 2.5$$

Es un efluente o compuesto biodegradable, pudiéndose utilizar sistemas biológicos como fangos activos o lechos bacterianos.

Y cuando

$$2.5 < (DQO/DBO_5) < 5$$

Es biodegradable siendo recomendable el empleo de lechos bacterianos.

Valores de la relación por encima de 5, constituyen efluentes no biodegradables que no pueden ser tratados por medios biológicos.

## **2.5. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA**

Los procesos químicos de oxidación avanzada usan oxidantes (químicos) para reducir los niveles de DBO/DQO, y para separar los componentes orgánicos y los componentes inorgánicos oxidables. Los procesos pueden oxidar totalmente los materiales orgánicos hasta carbono, CO<sub>2</sub> y agua; aunque a menudo no es necesario operar estos procesos hasta este nivel de tratamiento (Haro R. y Estrada G, 2014).

Sin embargo, los procesos de oxidación avanzada a menudo tienen un capital y unos costos operacionales altos comparados con el tratamiento biológico.

Según, Haro R. y Estrada G. (2014), existe una amplia gama de procesos de oxidación avanzada:

- Procesos de oxidación química usando peróxido de hidrógeno, ozono, peróxido y ozono combinados, hipoclorito, reactivo Fenton, etc.
- Elevación de la oxidación ultra violeta tanto como UV/ozono, UV/Peróxido de hidrógeno, UV/aire.
- Oxidación del aire húmedo y oxidación catalítica del aire húmedo (donde el aire es usado como oxidante).

Los procesos de oxidación avanzada son particularmente apropiados para aguas residuales que contienen recalcitrantes, tóxicos o materiales no-biodegradables. Los procesos ofrecen algunas ventajas sobre los procesos físicos y biológicos incluyendo:

- Procesos de operatividad
- Operaciones desatendidas
- La ausencia de residuos secundarios
- La habilidad para manejar fluctuaciones de flujo impuestas, y composiciones.

La variante más indicada para cada aplicación es elegida en base a las propiedades químicas del agua residual.

Según el boletín técnico sobre reducción de DBO y DQO con Peróxido de Hidrógeno emitido por la empresa mexicana Electro Química Mexicana el  $H_2O_2$  se puede utilizar solo o con los catalizadores, tales como hierro ( $Fe^{2+}$  o  $Fe^{3+}$ ), luz UV, ozono ( $O_3$ ) y álcali, para oxidar compuestos que contribuyen de DBO/DQO en aguas residuales. El tipo de oxidación depende del tipo de DBO/DQO. Los sistemas oxidantes están presentes en la tabla de abajo.

Sistema del oxidante	Demanda de oxígeno producido por reacción química		
	Tipo A (Sulfuro, Thiosulfate, sulfito)	Tipo B (Fenoles, cianuros, aminas)	Tipo C (BTEX, TOCl, parafina)
<b>Tipo A</b>			
H2O2	X		
<b>Tipo B</b>			
H2O2/OH-	X	X	
H2O2/M+	X	X	
H2O2/H+	X	X	
<b>Tipo C</b>			
H2O2/FE	X	X	X
H2O2/O3	X	X	X
H2O2/UV	X	X	X

Nota: Si un sistema oxidante degradará un agente contaminador específico (es decir, afectar DQO) dependerá del sistema del oxidante y del agente contaminador. Los oxidantes de tipo A reaccionan solamente con el tipo agentes contaminadores de A; mientras que, los oxidantes de tipo C, siendo más reactivo, reaccionara con la mayoría del cualquier agente contaminador. Sin embargo, el oxidantes tipo C reacciona generalmente con agentes contaminantes de tipo A.

**Figura 1: Demanda de oxígeno producida por reacción química.**

FUENTE: Reducción de DBO y DOQ con Peróxido de Hidrógeno.

ELECTRO QUÍMICA MEXICACA S.A. DE C.V. Boletín Técnico. FMC.

En la Figura 1, se puede verificar la eficiencia del reactivo Fenton en la oxidación de los tres tipos posibles de sistema oxidante; es decir, degrada aguas residuales con contenidos de sulfuros, sulfitos, fenoles, cianuros, aminas, BTEX<sup>4</sup>, TOCl<sup>5</sup>, parafinas.

## 2.6. PRINCIPIO QUÍMICO DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)

Una gran cantidad de estudios recientes sobre el tratamiento de aguas residuales, se centran en la oxidación de los contaminantes orgánicos persistentes disueltos en el agua, compuestos refractarios a su detoxificación, mediante procesos biológicos convencionales. Los métodos basados en la oxidación química o fotoquímica de dichos

<sup>4</sup> BTEX es un acrónimo de los compuestos químicos benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, pertenecen a la categoría de contaminantes que se denomina compuestos orgánicos volátiles.

<sup>5</sup> TOCl es un acrónimo usado para compuestos químicos órgano clorados.

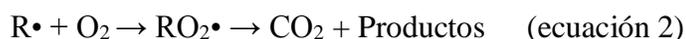
contaminantes constituyen un grupo de nuevas tecnologías denominadas genéricamente Procesos de Oxidación Avanzada.

Según Haro R. y Estrada G. (2014) los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs<sup>6</sup> “Advanced Oxidation Processes”) son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes.

Glaze y colaboradores, citados por Haro R. y Estrada G. (2014) definieron los Procesos de Oxidación Avanzada como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, fundamentalmente el radical hidroxilo OH•, especie de gran poder oxidante debido a su elevado potencial redox, potencial sólo superado por el flúor. Se debe indicar, sin embargo, que no en todos los POA<sup>7</sup>s se generan radicales hidroxilo y que en algunos casos no son la única especie oxidante implicada en el proceso.

Sin embargo, en la gran mayoría de procesos de oxidación avanzada, a partir de diferentes combinaciones de ozono, peróxido de hidrógeno, radiaciones UV y dióxido de titanio, o mediante el reactivo Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>), se producen radicales OH•.

Los radicales OH• generados en disolución son los responsables de la oxidación de los compuestos orgánicos (RH en la ecuación 1) por captura de hidrógeno y formación de un radical orgánico (ecuación 1), que puede reaccionar con el oxígeno atmosférico formando peroxirradicales (ecuación 2), que dan lugar a una serie de reacciones de degradación oxidativa, alcanzando en algunos casos la mineralización completa de la materia orgánica. (Haro R. y Estrada G. 2014)

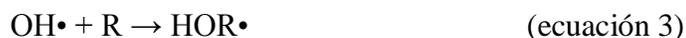


Los radicales hidroxilo pueden actuar frente a los compuestos orgánicos (R en la ecuación 3) mediante otros mecanismos de reacción, como la adición electrofílica (ecuación 3) o la transferencia de electrones (ecuación 4).

---

<sup>6</sup> Procesos de Oxidación Avanzada por sus ciclas en inglés.

<sup>7</sup> POAs Procesos de Oxidación Avanzada.



De igual forma se pueden producir recombinaciones entre radicales hidroxilo para formar peróxido de hidrógeno (ecuación 5), o se pueden formar radicales perhidroxilo en presencia de exceso de peróxido de hidrógeno (ecuación 6).

Radical perhidroxilo que parece no contribuir a las degradaciones oxidativas, por su menor reactividad.



Los POAs se clasifican en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos, en función de la utilización o no de radiaciones luminosas en el proceso.

Según el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT; las principales ventajas de estas nuevas tecnologías frente a los métodos convencionales, para el tratamiento de aguas residuales industriales son las siguientes:

Los contaminantes se destruyen, no se concentran ni cambian de fase.

- Puede alcanzarse la mineralización total de los contaminantes orgánicos.
- Usualmente no generan barros que requieran tratamiento y/o eliminación.
- Los reactivos utilizados como oxidantes son sustancias que se descomponen durante el proceso en productos inocuos.
- Son muy útiles para eliminar contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico. Mejoran la biodegradabilidad del agua residual, permitiendo acoplar un tratamiento biológico posterior.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.
- Generalmente mejoran las características organolépticas de las aguas tratadas.

Los Procesos de Oxidación Avanzada son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico frente a contaminantes resistentes a la biodegradación

o como proceso de tratamiento secundario para mejorar las características de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores.

La eficiencia de estas técnicas se debe en gran medida, como se ha indicado anteriormente, a la participación del radical hidroxilo, que proporciona procesos termodinámicamente más favorables y velocidades de oxidación superiores, que empleando otros métodos de oxidación. Según Haro R. y Estrada G. (2014) el radical hidroxilo es capaz de atacar prácticamente a todos los compuestos orgánicos y reaccionar 106 – 1012 veces más rápido que oxidantes alternativos como el ozono.

## **2.7. PROCESO FENTON**

Un método de tratamiento químico que no ha recibido merecida atención es el proceso de oxidación avanzada conocido como proceso Fenton. En este proceso la carga contaminante se trata con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo Fenton), típicamente a presión atmosférica y temperatura entre 20 °C y 40 °C (Martínez E. y López G., 2013). Siguiendo una apropiada política para el agregado del reactivo Fenton en condiciones ácidas y con la temperatura apropiada, el proceso puede alcanzar una significativa degradación de los contaminantes orgánicos, comprendiendo:

- i. Un cambio estructural de los compuestos orgánicos que posibilitan un eventual tratamiento biológico posterior,
- ii. Una oxidación parcial que redundará en una disminución de la toxicidad del efluente,
- iii. Una oxidación total de los compuestos orgánicos en sustancias inocuas que posibilitan una descarga segura del efluente sin necesidad de un posterior tratamiento.

Según Martínez E. y López G., (2013), la efectividad y economía del proceso Fenton dependen crucialmente de dos aspectos claves: la política de agregado del reactivo Fenton y la estrategia elegida para el control de la exotermia de la reacción. La concentración y composición inicial de la carga orgánica que puede oxidarse en contraste con los

requisitos para la descarga del efluente, determinarán la duración y consumos (catalizador + peróxido) para cada lote. En el curso del tratamiento, el contenido del reactor se concentra en productos más y más refractarios a la oxidación lo que produce un incremento gradual de la medición de POR<sup>8</sup>. En una operación por lotes, el agregado de peróxido puede interrumpirse cuando la señal de POR alcanza un cierto nivel, digamos 350-400 milivoltios, permitiendo que el tratamiento continúe por algunos minutos. Si en este intervalo, el potencial POR se estabiliza, puede considerarse que el tratamiento ha sido completado exitosamente. En caso contrario, el agregado de la mezcla oxidante debe comenzar nuevamente. Los cuellos de botella respecto de la velocidad de oxidación se encuentran con frecuencia en la generación de los radicales hidroxilos y en la eficacia para eliminar el calor producido en la reacción.

## **2.8. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO FENTON**

### *Efecto del pH*

Los procesos Fenton, tienen una actividad catalítica máxima a un pH de 2,8 aproximadamente. El pH influye en la generación de radicales hidroxilo y por ello, en la eficiencia de la oxidación. Para valores del pH por encima de 4, la degradación disminuye drásticamente, aparecen precipitados de hidróxido de hierro y disminuye la cantidad de Fe<sup>2+</sup> disponible. (Martínez E. y López G., 2013).

### *Influencia de la concentración inicial de peróxido de hidrógeno*

La velocidad de degradación aumenta con la cantidad de peróxido de hidrógeno, debido a la mayor producción de radicales hidroxilo. No obstante, a partir de una determinada cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la velocidad de la reacción puede verse negativamente afectada, debido posiblemente a la auto-descomposición del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en oxígeno y agua, por recombinación con radicales hidroxilo (ecuación 7).

---

<sup>8</sup> Potencial Oxido – Reducción.



La concentración de peróxido de hidrogeno óptima depende de la naturaleza y concentración del compuesto a tratar y de la concentración de hierro. (Martínez E. y López G., 2013).

#### *Efecto de la cantidad de sal de hierro*

Igual que en el caso del peróxido de hidrógeno, la velocidad de degradación aumenta con la cantidad de sal empleada, pero a partir de una determinada turbidez de la disolución, que dificulta la absorción de luz necesaria para la realización del proceso Fenton dada concentración de hierro disminuye la eficiencia de la reacción.

Además altas concentraciones hierro producen incrementos bruscos de la temperatura, lo que puede también disminuir la eficiencia de la reacción debido a que disminuye la estabilidad del  $\text{H}_2\text{O}_2$ , y a que altos valores de temperatura aumentan la velocidad de degradación del  $\text{H}_2\text{O}_2$  a  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Martínez E. y López G., 2013) (Ecuación 8).



## **2.9. PRUEBA DE JARRAS**

Según, Quijandría S. (2012) se define la prueba de jarras como una prueba de laboratorio que permite determinar las dosis de reactivos, mezcla y velocidad requeridas para alcanzar objetivos definidos de calidad en una muestra de agua.

La prueba de jarras se realiza con dos fines principalmente:

1. Como herramienta para diseñar una Planta de Agua Potable.
2. Como SIMULADOR, para determinar en laboratorio las dosis de insumos químicos que deben aplicarse en una Planta ya existente a fin de lograr cambios favorables en la Calidad del Agua.

## 2.10. TÉCNICAS ESTADÍSTICAS

ANOVA de un factor:

Permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de K poblaciones ( $K > 2$ ) son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Este contraste es fundamental en el análisis de resultados experimentales, en los que interesa comparar los resultados de K 'tratamientos' o 'factores' con respecto a la variable dependiente o de interés.

El ANOVA requiere el cumplimiento los siguientes supuestos:

- Las poblaciones (distribuciones de probabilidad de la variable dependiente correspondiente a cada factor) son normales.
- Las K muestras sobre las que se aplican los tratamientos son independientes.
- Las poblaciones tienen todas igual varianza (homoscedasticidad).

Fórmula:

$$F = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2} = \frac{n \hat{\sigma}_{\bar{Y}}^2}{\bar{S}_j^2}$$

Homogeneidad de Varianzas: Esta opción permite contrastar este supuesto mediante la prueba de Levene, y nos permitirá identificar el método de evaluación de comparaciones múltiples.

Comparaciones múltiples

- Pruebas post hoc DMS: Diferencia mínima significativa, basada en la distribución t de Student. Este método no ejerce control sobre la tasa de error. Cada comparación se lleva a cabo utilizando el nivel de significación establecido (0.005).

- Pruebas post hoc Tamhane: En el caso de que no podamos suponer varianzas poblacionales iguales, la tabla de dialogo Post hoc permite elegir la T2 de Tamhane, que es un método basado en la distribución del módulo máximo estudentizado.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Se realizó una investigación de tipo exploratorio, en la que se determinaron los valores óptimos de la dosis de reactivo Fenton para alcanzar la máxima reducción de DQO del lixiviado del depósito de seguridad de Befesa Perú. Las variables involucradas se manipularon en condiciones controladas de laboratorio.

#### **3.2. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS**

El reactivo Fenton tiene una eficiencia de remoción de DQO superior al 70 %, en el lixiviado del depósito de seguridad de Befesa Perú.

#### **3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA**

##### **3.3.1. Monitoreo preliminar**

El lixiviado del depósito de seguridad de Befesa es generado de manera continua, y se va acumulando en una balsa impermeabilizada de 450 m<sup>3</sup>; es decir, la generación es constante en el tiempo.

Con la intención de determinar el tipo y volumen de muestra a coleccionar para los experimentos; se realizó un monitoreo previo a la redacción del proyecto de esta investigación, con el objetivo de observar si las concentraciones de DQO y DBO sufren cambios significativos en el tiempo, o no.

Durante un mes, entre el 21 de setiembre y el 21 de octubre del 2015, se determinó el volumen de lixiviado generado y se realizó un monitoreo periódico de la calidad del pasivo almacenado en la balsa.

Se monitoreó la DBO y DQO de una muestra tomada una vez por semana; a aproximadamente a 50 cm por debajo de la superficie del espejo de lixiviado, a un metro de uno de los bordes de la balsa después de haber recirculado su contenido durante una hora con una bomba sumergible de 7.1 HP.

Los resultados indican que durante el mes evaluado se generaron 85 m<sup>3</sup> de lixiviado aproximadamente y que los parámetros DBO y DQO no varían significativamente a pesar de que ingresó el volumen mencionado a la balsa. Por lo que el sistema se ajusta a un muestreo simple<sup>9</sup>. Ver Tabla 2.

**Tabla 2: Resumen de resultados de la prueba preliminar, monitoreo de DQO**

<b>N° de Semana</b>	<b>Fecha</b>	<b>DQO (mg/l)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>
1	24/09/2015	10981.20	61.60
2	01/10/2015	12350.10	70.20
3	08/10/2015	10883.20	55.40
4	15/10/2015	11394.50	68.20
<b>Promedio</b>		11402.25	63.85
<b>Desviación Estándar</b>		669.62	6.72
<b>Coefficiente de Variación</b>		<b>5.87%</b>	<b>10.53%</b>

FUENTE: Reporte de Resultados. Área Laboratorio Químico. Befesa Perú. (Octubre 2015).

---

<sup>9</sup> “Se caracteriza porque cada elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser elegido. Si se dispone de una lista de los elementos de la población, la selección de una muestra aleatoria simple es muy sencilla.”(Morillas A. et al. 2015).

### **3.3.2. Muestra para los experimentos**

Al coleccionar la muestra para el desarrollo de los experimentos, se envi6 una porci6n representativa a un laboratorio certificado, para la caracterizaci6n inicial de la muestra con el objetivo de que una vez concluido el tratamiento se evalu6 la eficiencia de remoci6n de contaminantes con relaci6n a la muestra sin tratar.

Se evalu6 el contenido de; cloruros, turbidez, DQO, DBO y metales totales. Las muestras fueron preservadas y refrigeradas segun indicaci6n del laboratorio.

Como se ver6 en el Capitulo VI, los valores de DQO y DBO devueltos en esta caracterizaci6n difirieron notablemente a los valores obtenidos en el estudio preliminar a la investigaci6n lo que provoc6 una modificaci6n en el rango de las relaciones  $p/p$   $H_2O_2/Fe^{2+}$  a probar; sin embargo el procedimiento para la realizaci6n de las corridas, se mantuvo igual al planteado en el proyecto de esta investigaci6n.

La gran diferencia entre el valor preliminar y el obtenido en la caracterizaci6n inicial pudo deberse a numerosos factores, entre los m6s importantes:

- Cambios en la operaci6n del dep6sito.
- Nuevos ingresos de sustancias con alta carga contaminante al vaso de vertido. Durante los meses de noviembre y diciembre del 2015 ingresaron a vaso de vertido efluentes de la industria de aditivos de concreto y lodos de succi6n de pozos s6pticos en vol6menes significativos (Reporte de Ingresos. Befesa 2015).
- Incremento en el valor m6ximo de humedad exigido para que un residuo ingrese al vaso de vertido.

### **3.3.3. Poblaci6n para los experimentos**

Se calcul6 el tama1o de muestra 6ptimo para asegurar representatividad, ajustado a  $4 \times 10^5$  litros (volumen de pasivo acumulado), considerando un nivel de confianza del 95% y 5% de error permitido. Segun Morillas A., Aguilar M., Caparr6s A. y D6az B (2015). Las ecuaciones para el c6lculo del tama1o de muestra son las siguientes:

$$n_0 = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2}$$

Donde:

$n_0$  = Tamaño de muestra

Z = Nivel de Confianza. Valor 1.96

p = Heterogeneidad. Se asume un valor de 50%

e = Error admitido

$$n_0 = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2} = \frac{1.96^2 * 0.5 * (1-0.5)}{0.05^2} = 384.16$$

Como se trata de una población finita (volumen conocido almacenado en la balsa), se realizará el ajuste según;

$$n' = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0 - 1}{N}}$$

Donde:

n = Tamaño de muestra ajustado (Muestreo Aleatorio Simple)

$n_0$  = Tamaño de muestra

N = Tamaño de la población

$$n' = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0 - 1}{N}} = \frac{384.16}{1 + \frac{384.16 - 1}{400000}} = 383.79$$

En conclusión y en concordancia con los cálculos presentados se colectó una muestra simple de 384 litros para la realización de los experimentos siguiendo el mismo proceso para la toma de muestra, que el aplicado en el monitoreo preliminar.

### 3.3.4. Identificación de variables

Se detalla el total de variables consideradas, bajo la forma en la que se incluyeron en el diseño experimental.

Para determinar el rango de dosis de  $\text{Fe}^{2+}$  y de dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a aplicar, se compararon los valores de las relaciones DQO/DBO y p/p  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  óptimas; de los lixiviados reportados en la investigación de Méndez R. et al. (2010), con la relación DQO/DBO obtenida en la caracterización inicial del lixiviado en estudio.

A través de una comparación simple, se establecieron las relaciones p/p  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  que se probaron en el test de jarras, con el objetivo de hallar la relación óptima para alcanzar la máxima remoción de DQO en el lixiviado en estudio. Los valores de las relaciones p/p  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  evaluados están comprendidos en el intervalo de  $1.6 \cdot 10^{-1}$  y 166.67

Debido a que el proceso Fenton ocurre a través de la acción conjunta de dos reactivos químicos ( $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), el experimento se realizó en dos etapas. Ver Tabla 3.

**Tabla 3: Manipulación de variables en el proceso experimental**

	<b>Primera Etapa</b>	<b>Segunda Etapa</b>
<b>Variable Independiente</b>	Dosis de $\text{H}_2\text{O}_2$	Dosis de $\text{FeSO}_4$
<b>Variable Dependiente</b>	Menor valor de DQO obtenido	Menor valor de DQO obtenido

FUENTE: Elaboración Propia.

En la primera etapa se manipuló la dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , y se eligió el valor óptimo de entre las dosis probadas, en función a la que devolvía el valor de DQO más bajo y que presentó estadísticamente, diferencia significativa con el resto de valores obtenidos; manteniendo fijas las demás variables que participan de la reacción.

En la segunda etapa, se manipuló la dosis de  $\text{FeSO}_4$ ; y se mantuvo fija la dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , este valor fijo fue el que resultó óptimo de la primera etapa.

### 3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para analizar si existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos, se utilizó el ANOVA<sup>10</sup> de un factor para cada una de las variables estudiadas.

Cada etapa del experimento se realizó por triplicado, con lo que se obtuvieron 3 valores por jarra (5 jarras por corrida, 2 corridas, 3 repeticiones por corrida); cada valor fue previamente analizado por la prueba de varianzas<sup>11</sup> con la finalidad de determinar la homogeneidad entre los datos obtenidos y poder aplicar e interpretar el valor del análisis de medias devuelto por ANOVA. Se utilizó el software SPSS Statistics 23.0 para Windows para este análisis.

Para la primera etapa del experimento se determinó la siguiente función:

$$y = f(x)$$

Donde:

**y:** Valor de DQO medido de cada repetición en la primera corrida.<sup>12</sup>

**x:** Dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (mg/l) agregado a cada jarra en la primera corrida.

---

<sup>10</sup> Técnica fundamental que, en su diseño más sencillo, desarrolla un contraste de hipótesis estadísticas, que afecta simultáneamente a los valores medios o esperados de  $k$  poblaciones (variables aleatorias) con distribución normal y homoscedásticas, es decir, con idénticas varianzas. Disponible en: <http://estadistica.bio.ucm.es/glosario2/anova.html>

<sup>11</sup> El análisis de la varianza permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de  $K$  poblaciones ( $K > 2$ ) son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Este contraste es fundamental en el análisis de resultados experimentales, en los que interesa comparar los resultados de  $K$  'tratamientos' o 'factores' con respecto a la variable dependiente o de interés. Disponible en: [http://www.ub.edu/aplica\\_infor/spss/cap4-7.htm](http://www.ub.edu/aplica_infor/spss/cap4-7.htm)

<sup>12</sup> Cada etapa del experimento incluye una corrida del test de jarras, cada corrida trabaja con 5 jarras con diferentes dosis del reactivo que juegue como variable independiente. Se realizaron 3 corridas del mismo experimento.

Se consideraron el resto de factores fijos, y como clave de identificación o variable dependiente; al menor valor de DQO obtenido.

La dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> agregada que devolvió el menor valor promedio de DQO; se consideró como la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> óptima; valor que se considerará como un valor fijo (constante) para la segunda etapa del experimento.

Para la segunda etapa del experimento se determinó la siguiente función:

$$y' = f(x')$$

Donde:

**y'**: Valor de DQO medido de cada repetición en la segunda corrida.

**x'**: Dosis de FeSO<sub>4</sub> (mg/l) agregado a cada jarra en la segunda corrida.

La dosis de FeSO<sub>4</sub> agregada que devolvió el menor valor promedio de DQO; se consideró como la dosis de FeSO<sub>4</sub> óptima.

Los valores de pH y temperatura fueron monitoreados durante la ocurrencia de todas las pruebas, pero se consideraron como constantes en el diseño experimental.

La variación en la concentración de iones disueltos en la muestra, se relacionará con la disminución de DQO, para contar con una evidencia que respalde la oxidación. La evaluación se realizó por cromatografía iónica.

### **3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.5.1. Caracterización inicial del lixiviado**

La muestra pura fue analizada en un laboratorio certificado para contar con una línea base de las principales características del lixiviado.

### **3.5.2. Acidificación de la muestra de lixiviado**

Se acidificó la muestra a tratar hasta llegar a un pH entre 2.5 y 3.0, valores determinados como más favorecedores para el desarrollo de la reacción de oxidación (Méndez. et al., 2010). Para este efecto, se utilizaron residuos ácidos líquidos de pH < 2<sup>13</sup> agregando un mililitro por vez y se midió el pH con un phmetro portátil marca Mettler Toledo.

### **3.5.3. Determinación de la dosis óptima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – corrida 1**

La dosis óptima de reactivo Fenton (Peróxido y Fe<sup>2+</sup>), se determinó en un equipo para prueba de jarras marca Phillips & Bird. Para todas las corridas de optimización de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como la de optimización de FeSO<sub>4</sub>, se realizaron 3 repeticiones.

Para obtener la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> óptima, se probaron 5 concentraciones de reactivo Fenton de relación [Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] 1.6\*10<sup>-1</sup>, 3.03\*10<sup>-1</sup>, 1.667, 3.03 y 166.67. Valores obtenidos por comparación de características del lixiviado en estudio, con los expuestos en la investigación de Méndez R. et al., (2010); en el que se evalúan distintas relaciones en función a la biodegradabilidad de los lixiviados de siete rellenos sanitarios de distintos países de distintos continentes.

Se incluyó un amplio rango de dosis con la finalidad de ubicar el punto de inflexión en la curva de concentración de DQO versus dosis de Peróxido de Hidrógeno en la primera corrida; para la segunda corrida se consideraron 5 concentraciones de reactivo Fenton de relación [Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] 8.3\*10<sup>-2</sup>, 4.17\*10<sup>-1</sup>, 8.33\*10<sup>-1</sup>, 1.67, 3.33; con el fin de optimizar la concentración de Sulfato de Hierro.

---

<sup>13</sup> Los residuos líquidos utilizados para el ensayo fueron proporcionados por Befesa, son residuos líquidos provenientes de ácidos fuertes contaminados.

### 3.5.4. Dosificación de reactivos

Se cargó 1 litro de muestra a cinco jarras de 2 litros de capacidad<sup>14</sup> cada una, se agregó el Sulfato Ferroso, se realizó la mezcla a 200 r.p.m. durante 5 minutos y posteriormente se agregó el Peróxido de Hidrógeno con una mezcla a 100 r.p.m., durante 20 minutos (Méndez R. et al., 2010), se retiraron las jarras del equipo de agitación y se las dejó en reposo por 24 horas para asegurar que se complete la reacción de oxidación.

Las dosis de cada reactivo responden a las relaciones descritas en el punto previo. Ver Tabla 4.

**Tabla 4: Primera corrida de jarras considerando el valor de Sulfato Ferroso fijo para todas las jarras y los valores de Peróxido de Hidrógeno calculados según las relaciones Fe/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> establecidas.**

Para cada jarra (1 litro)				
Jarra	Datos de entrada		Cálculo	
	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O (g)	Relación Peso Fe/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50% p/p (g)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50% (ml)
1	20	166.67	0.12	0.1
2	20	3.030	6.6	5.5
3	20	1.667	12	10
4	20	0.303	66	55
5	20	1.67*10 <sup>-1</sup>	120	100
<b>Total</b>	100			170.6

(\*) Los Resultados se incluirán en el siguiente capítulo.

FUENTE: Elaboración Propia.

<sup>14</sup> Se trabajó con jarras de 2 litros de capacidad debido a que a ciertas dosis de reactivo Fenton la muestra efervesce llegando a duplicar su volumen.

### **3.5.5. Control de temperatura**

Una vez dosificado el peróxido se inició el control de temperatura a fin de analizar los efectos de la temperatura en la DQO, además de contar con un valor de determinación para el diseño en caso se implemente el tratamiento a mayor escala

### **3.5.6. Neutralización de las muestras y verificación de ph**

Concluido el control de temperatura se dejó las jarras en exposición a la luz solar y en reposo durante 24 horas. Concluido este tiempo se colectó una muestra de 80 ml en vasos beacker de 200 ml y se realizó la neutralización de las muestras adicionando a cada vaso, 50 ml de Hidróxido de Sodio 1 N.

### **3.5.7. Filtración de la muestra neutralizada**

A cada vaso con la muestra neutralizada se le adicionó 2 gramos de carbón activado pulverizado (Méndez R. et al., 2010), se realizó la mezcla manual y se dejó actuar durante 30 minutos, agitando la mezcla manualmente cada 5 minutos; una vez concluido este tiempo se filtró la mezcla utilizando papel filtro de filtración rápida.

### **3.5.8. Determinación de la DQO y concentración de iones**

Con el producto filtrado se realizaron dos diluciones; se diluyó 1 en 25 para la preparación de las muestras para la cuantificación de DQO y se diluyó 1 en 500 para la preparación de las muestras con las que se realizó la cuantificación de los iones disueltos por cromatografía iónica.

El valor óptimo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> fue el que devolvió el valor de DQO más bajo al graficar la relación [Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] con respecto de los valores de DQO obtenidos y la mayor concentración de iones producto del proceso de oxidación. Para la primera corrida se

consideró constante el valor de Sulfato Ferroso con una concentración óptima teórica de 20 000 mg/l (Méndez R. et al., 2010).

### **3.5.9. Determinación de la relación p/p $\text{Fe}^{2+}$ / $\text{H}_2\text{O}_2$ óptima**

La relación óptima fue la que devolvió el valor de DOQ más bajo y la mayor concentración de iones producto del proceso de oxidación, al graficar las relaciones peso/peso  $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2$  utilizadas con respecto de los valores de DQO obtenidos durante la primera corrida.

### **3.5.10. Determinación de la dosis óptima de $\text{Fe}^{2+}$ - corrida 2**

Para obtener la dosis de Sulfato Ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) óptima, se probaron 5 dosis de reactivo Fenton con la relación  $[\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2]$  que resultó óptima. Cada ensayo se realizó respetando el procedimiento y los periodos de tiempo establecidos, empleados para la corrida 1. Es decir, en esta corrida se replicarán los puntos 5.6.4 hasta 5.6.8. Pero para la optimización de  $\text{FeSO}_4$ . Se consideró la dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  óptima a la que devolvió el valor de DOQ más bajo al graficar las relaciones p/p  $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}_2$  utilizadas con respecto de los valores de DQO obtenidos y la mayor concentración de iones producto del proceso de oxidación.

## **3.6. INSTRUMENTOS DE COLECTA DE DATOS**

La muestra compuesta se colectó en 4 cilindros plásticos con suncho de 100 litros de capacidad y se transportaron al laboratorio de Ingeniería de Agua Residual de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Los reactivos utilizados para las pruebas de laboratorio fueron:

- $\text{H}_2\text{O}_2$  a 50% p/p
- $\text{Fe}^{2+}$  a partir de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

- Residuos ácidos de pH < 2
- NaOH 1 N
- Carbón Activado de Hulla Bituminosa Pulverizado

La parte experimental requiere los siguientes materiales:

- Galoneras de 10 litros de capacidad
- Bagueta de vidrio de 80 cm
- 5 jarras pirex de 2 l de capacidad
- 5 muestreadores para jarras de 2 l.
- 50 viales de alto rango plus 20 -15000 marca Hach
- Pipeta volumétrica de 2 ml.
- Pipeta de 10 ml.
- Pipeta de 5 ml.
- Pipeta de 1 ml.
- Bomba manual de succión
- Probeta de 1 l
- Probeta de 250 ml
- Probeta de 100 ml
- 5 vasos beaker de 200 ml
- 5 embudos de vidrio de 75mm
- 5 fioles de 25 ml
- 5 fioles de 100 ml
- 50 Frascos de 120 ml con tapa y contra tapa
- 50 Jeringas de 5 ml
- Papel filtro
- Papel Tissue

Los equipos a utilizados fueron:

- Equipo para prueba de jarras marca Phillips & Bird
- phmetro multifunción marca Mettler Toledo
- Equipo para digestión de viales marca Hach

- Espectrofómetro marca Hach
- Cromatógrafo Iónico marca DIONEX
- Fotómetro UV-Vis marca GENESIS 2
- Balanza analítica electrónica
- Cronómetro digital
- Equipos de Protección Personal (Respirador con filtro para gases, guantes de nitrilo, guantes de neopreno, lentes de seguridad, guardapolvo).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL LIXIVIADO

Las muestras fueron entregadas el 14 de abril del 2016 a Certimín, las muestras perecibles fueron analizadas dentro de las 24 horas. Resultados Tablas 5 y 6. Informe Final de resultados emitido por Certimín, Ver ANEXO 1.

**Tabla 5: Resultados caracterización inicial del lixiviado**

SAMPLE	DESCRIPTION	MIN DETECTION	Única	Blank
<b>Fecha</b>	Monitoreo		14/04/2016 12:05	
<b>Tipo</b>	Muestra		Agua de Proceso	
<b>Cl-</b>	mg/L	1	43852	<1
<b>Turbidez</b>	NTU	1	> 4000.0	<1.0
<b>DBO</b>	mg/L	2	31813.33	<2.00
<b>DQO</b>	mg/L	10	57807	

FUENTE: Informe final de resultados. Certimín Perú.

El contenido de Cloruros superó los 43000 mg/l aspecto que fue tomado en cuenta para la cuantificación de la DQO por ser un interferente importante en la medición. Este resultado condujo a decidir hacer uso de viales tipo alto rango plus para la cuantificación de la DQO, debido a que estos permiten realizar una cuantificación precisa en muestras con alto contenido de cloruros.

El lixiviado posee una carga orgánica alta (concentración de DBO y DQO). Los resultados reportados por Certimín difieren de los obtenidos en la evaluación previa al inicio de esa investigación, en la que en promedio la DBO y la DQO alcanzaban valores mucho menores, aproximadamente 63.85 mg/l y 11402.25 mg/l respectivamente. Ver Capítulo V, Punto 5.5.

Esta variación en la calidad del lixiviado genera un cambio en el índice de biodegradabilidad, que pasó de 178.6 en el estudio preliminar a 1.82 en la caracterización inicial, lo que indicaría que el residuo líquido es biodegradable, y que es posible la aplicación de un sistema biológico para su descontaminación; sin embargo, es un efluente con alta concentración de metales, compuestos altamente tóxicos para un reactor biológico. Ver Tabla 6.

**Tabla 6: Resultados caracterización inicial del lixiviado. Metales totales.**

<b>SAMPLE</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>MIN DETECTION</b>	<b>Única</b>	<b>Blank</b>
<b>Hg(t)</b>	mg/L	0.0001	0.0027	<0.0001
<b>Ag(t)</b>	mg/L	0.002	<0.002	<0.002
<b>Al(t)</b>	mg/L	0.02	3.38	<0.02
<b>As(t)</b>	mg/L	0.008	5.351	<0.008
<b>Ba(t)</b>	mg/L	0.001	0.547	<0.001
<b>Be(t)</b>	mg/L	0.0003	<0.0003	<0.0003
<b>Bi(t)</b>	mg/L	0.02	<0.02	<0.02
<b>B(t)</b>	mg/L	0.003	75.035	<0.003
<b>Ca(t)</b>	mg/L	0.05	811.48	<0.05
<b>Cd(t)</b>	mg/L	0.001	16.679	<0.001
<b>Ce(t)</b>	mg/L	0.02	<0.02	<0.02
<b>Co(t)</b>	mg/L	0.002	0.389	<0.002
<b>Cr(t)</b>	mg/L	0.004	1.521	<0.004
<b>Cu(t)</b>	mg/L	0.003	1.024	<0.003
<b>Fe(t)</b>	mg/L	0.01	261.79	<0.01
<b>K(t)</b>	mg/L	0.01	1522.31	<0.01
<b>Li(t)</b>	mg/L	0.004	6.536	<0.004
<b>Mg(t)</b>	mg/L	0.02	959.42	<0.02
<b>Mn(t)</b>	mg/L	0.001	25.749	<0.001
<b>Mo(t)</b>	mg/L	0.004	0.796	<0.004
<b>Na(t)</b>	mg/L	0.01	> 2250.0	<0.01
<b>Ni(t)</b>	mg/L	0.002	4.647	<0.002
<b>P(t)</b>	mg/L	0.06	20.36	<0.06
<b>Pb(t)</b>	mg/L	0.01	5.2	<0.01
<b>Sb(t)</b>	mg/L	0.008	1.103	<0.008
<b>Se(t)</b>	mg/L	0.02	<0.02	<0.02
<b>SiO2(t)</b>	mg/L	0.02	55.85	<0.02

Continuación...

<b>SAMPLE</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>MIN DETECTION</b>	<b>Única</b>	<b>Blank</b>
<b>Sn(t)</b>	mg/L	0.007	<0.007	<0.007
<b>Sr(t)</b>	mg/L	0.0007	5.5254	<0.0007
<b>Ti(t)</b>	mg/L	0.01	0.5	<0.01
<b>Tl(t)</b>	mg/L	0.05	<0.05	<0.05
<b>V(t)</b>	mg/L	0.003	3.264	<0.003
<b>Zn(t)</b>	mg/L	0.005	38.934	<0.005

FUENTE: Informe final de resultados. Certimín Perú.

Los metales con mayores concentraciones presentes en el lixiviado, son:

- Arsénico
- Boro
- Cadmio
- Hierro
- Potasio
- Litio
- Magnesio
- Manganeso
- Niquel
- Fósforo
- Óxido de Silicio
- Estroncio
- Zinc

Concluido el tratamiento se realizó una caracterización final de la muestra tratada con la intención de analizar la variación de la concentración de los contaminantes y la aparición de formas oxidadas; la comparación se realizó con los valores devueltos por el mismo laboratorio certificado.

## **4.2. ACIDIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE LIXIVIADO**

La muestra pura tiene un pH de 7.534<sup>15</sup> en el momento de la toma de muestra en los cilindros en los que fue dispuesta para su traslado. A cada cilindro de aproximadamente 80 litros se le adicionó 1 litro de residuos ácidos de pH menor a 2.

Se verificó el valor de pH de la muestra de lixiviado homogenizada en 2.629 unidades de pH. La muestra se encontraba contenida en cilindros plásticos con tapa hermética a temperatura ambiente, no fue refrigerada ni durante el traslado desde el punto de colecta<sup>16</sup> hasta la Universidad Nacional Agraria La Molina ni durante la realización de las pruebas de laboratorio.

La totalidad de las pruebas cuyos resultados se entregan a continuación se realizaron entre las 9:00 y las 12:00 horas, en presencia de luz natural.

## **4.3. DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – CORRIDA 1**

Se consideró por corrida 5 jarras con un litro de lixiviado cada una; se presentará el peso dosificado de cada uno de los reactivos aplicados a cada jarra y, los valores de pH y de temperatura monitoreados durante el ensayo.

### **4.3.1. Peso de sulfato de hierro dosificado por jarra**

En la Tabla 7 se reportan los pesos de FeSO<sub>4</sub> dosificado para la corrida 1.

---

<sup>15</sup> Valor determinado en campo con equipo medidor de pH, marca y modelo WTW pH 330i.

<sup>16</sup> La muestra fue colectada de la balsa de almacenamiento del lixiviado generado en el depósito de seguridad de Befesa Perú. Descripción del procedimiento de toma de muestra en la Metodología.

**Tabla 7: Peso de FeSO<sub>4</sub> para la corrida 1; valor inicial, repetición 1 y repetición 2.**

Nro. De Jarra	Peso de FeSO <sub>4</sub> (g)		
	Inicial	Repetición 1	Repetición 2
1	20.0937	20.0106	20.0345
2	20.0689	20.1096	20.0873
3	20.0653	20.0488	20.0132
4	20.0658	20.0364	20.0012
5	20.0756	20.0302	20.0754
Promedio	20.0739	20.0471	20.0423
Desviación Estándar	0.0106	0.0376	0.0378

FUENTE: Elaboración Propia.

Se eligió la dosis de 20000 mg/l de FeSO<sub>4</sub> como valor fijo para la optimización de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. (Méndez R. et al. 2010).

Como se trabajó con 6 cifras significativas la variación entre los pesos, resulta no ser significativa.

#### **4.3.2. Volumen de peróxido de hidrógeno dosificado por jarra**

Se consideró la gravedad específica del Peróxido de Hidrógeno 1.2.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Ficha Técnica Peróxido de Hidrógeno 50% Grado Técnico. Cumpa S.A.S. Insumos y Tecnología para la Industria Alimentaria.

**Tabla 8: Volumen y peso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la corrida 1.**

<b>Nro. De Jarra</b>	<b>Relación Fe/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	<b>Peso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (g)</b>	<b>Volumen de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (ml)*</b>
1	166.67	0.12	0.1
2	3.030	6.6	5.5
3	1.667	12	10
4	0.303	66	55
5	0.167	120	100

FUENTE: Elaboración Propia.

\* El volumen aplicado por jarra fue cuantificado utilizando una jeringa para la dosis de la jarra 1 y probetas para las jarras 2, 3, 4 y 5.

El volumen indicado en la Tabla 8. Se dosificó por igual a la prueba inicial y a sus dos repeticiones.

### **4.3.3. Control de temperatura**

La mezcla ocurrió hasta 20 minutos después de aplicada la dosis de Peróxido de Hidrogeno, concluido este tiempo el equipo de test de jarras se detuvo y se retiraron la jarras del equipo. Por lo tanto, los dos últimos valores de temperatura reportados en la Tabla 9 fueron medidos sin agitación.

**Tabla 9: Control de temperatura e intervalos de medición. Corrida 1.**

Nro. De Jarra	1			2			3			4			5		
	I	R1	R2												
0	21	21	19	21	21	19	21	21	19	21	21	19	21	21	19
5	24	24	23	26	26	25	30	30	30	39	40	38	60	60	56
10	25	25	24	27	27	27	30	30	29	42	42	39	70	70	66
15	25	25	25	28	29	28	30	30	29	46	50	47	85	86	85
20	25	25	25	28	28	27	31	31	30	53	54	52	82	83	80
25	24	24	22	26	26	25	31	31	28	52	52	51	77	77	75
30	23	23	20	26	26	24	30	30	28	52	52	51	68	68	66

FUENTE: Elaboración Propia.

I: Corrida 1 prueba Inicial

R1: Corrida 1 – Repetición 1

R2: Corrida 1 – Repetición 2

La variación de temperatura está relacionada con la dosis de Peróxido de Hidrógeno; mientras mayor es la dosis aplicada la reacción es más exotérmica manifestándose esto con un incremento de la temperatura. Los tiempos de ocurrencia de la temperatura máxima promedio son independientes de la dosis de Peróxido de Hidrógeno aplicadas, debido a que en todas las jarras, las temperaturas promedio máximas alcanzadas ocurren entre los 15 y 20 minutos.

La jarra 1 alcanzó una temperatura promedio máxima de 25°C a los 15 minutos de aplicada su dosis de Peróxido y posteriormente la temperatura comenzó a descender; el comportamiento es similar en el resto de jarras; en la N° 2 la temperatura promedio máxima alcanzada fue de 28.3° C a los 15 minutos de aplicada su dosis de Peróxido, la jarra N° 3 alcanzó 30.7° C a los 20 minutos, la jarra N° 4 alcanzó 53° C a los 25 minutos y la jarra N° 5 alcanzó 85.3° C a los 15 minutos.

En las jarras N° 4 y N° 5 se presentó espuma flotante durante la agitación, la jarra N° 4 alcanzó 1cm de espuma que se mantuvo hasta concluida la agitación; mientras que la jarra N° 5 efervesció por unos segundos presentando un burbujeo intenso e incremento del volumen de la muestra tratada hasta llegar a derramarse parte de ella; esto ocurrió cuando alcanzó una temperatura de aproximadamente 83° C, el burbujeo cesó en cuanto inició el descenso de la temperatura. Ver ANEXO 3 Foto 5.

#### 4.3.4. Neutralización de las muestras y verificación de pH

Concluidas las 24 horas de reposo de las jarras con muestra tratada se realizó su neutralización y se verificó el valor de pH conseguido. Ver Tabla 10.

**Tabla 10: Control de pH. Corrida 1.**

Nro. De Jarra	pH		
	Inicial	Repetición 1	Repetición 2
1	6.957	7.25	7.03
2	7.125	7.363	7.321
3	7.407	7.843	6.997
4	7.331	7.573	7.023
5	7.298	6.787	7.432

FUENTE: Elaboración Propia.

Se fueron realizando ajustes del pH agregando un ml de NaOH o uno de muestra ácida en los casos en los que fue necesario.

Se consideraron válidos todos los valores contenidos en el rango entre 6.5 y 7.5, debido a que en este pH el hierro es insoluble formándose Hidróxido de Hierro en forma de un lodo voluminoso que posteriormente fue removido por filtración. Ver ANEXO 3 Foto 10.

A la muestra neutralizada se le agregó carbón activado y se dejó actuar; según lo indicado en el Capítulo V.

### **4.3.5. Filtración de la muestra neutralizada**

Mediante la filtración se retuvo el precipitado de Hidróxido de Hierro que se formó en la neutralización, y el carbón activado previamente dosificado.

Se observó la pérdida casi total de color, sólidos y olor en el producto filtrado, Ver ANEXO 3 Fotos 11 y 13.

### **4.3.6. Determinación de la DQO**

De cada una de las muestras filtradas se realizó una dilución de 1 en 25 para la cuantificación de la DQO.

Hatch Company en su manual de Análisis de Agua para procedimientos fotométricos indica que en caso se requiera reducir aún más el contenido de cloruros sin provocar que la concentración de DQO sea demasiado baja para una determinación exacta, se debe agregar 0.5 g de Sulfato Mercuríco ( $\text{HgSO}_4$ ) antes de agregar la muestra a analizar permitiendo una concentración de cloruros máxima de 40000 mg/l.<sup>18</sup>

Como se analizó en el punto 6.1 caracterización inicial del lixiviado, la concentración de cloruros fue de 43852 mg/l en la muestra pura; es decir, sin acidificar y sin haber sido sometida a tratamiento. El proceso aplicado es altamente oxidativo por lo que se esperaba que el valor de cloruros disminuya en la muestra apareciendo formas oxidadas del cloro. Sin embargo, como en esta etapa de la investigación (muestra tratada y filtrada) no se realizó la cuantificación de cloruros, se trabajó con una dilución que asegure la no interferencia de los cloruros y una adecuada cuantificación de la DQO (valor que permita una cuantificación precisa). Para esta investigación no fue necesaria la adición de Sulfato Mercuríco.

La cuantificación de la DQO se realizó en un espectofotómetro marca Hatch haciendo uso de viales alto rango Plus de la misma marca. Se decidió hacer uso de estos viales debido a que permiten cuantificar valores de DQO entre 20 y 15000 mg/l y que toleran una

---

<sup>18</sup> MANUAL DE ANÁLISIS DE AGUA. HATCH Company. Segunda edición en español. Procedimientos fotométricos para agua residual. Página. 188.

concentración de cloruros de hasta 20000 mg/l en muestras puras y de hasta 10000 mg/l en muestras diluidas<sup>19</sup>. Esta propiedad es posible debido a que los viales alto rango plus, contienen Sulfato Mercúrico (HgSO<sub>4</sub>) en su composición.

Los resultados de la primera corrida se reportan en la siguiente tabla, como se puede observar se incluye las dosis de los reactivos aplicada a cada jarra, los valores de la dosis de FeSO<sub>4</sub> permanecen constantes para todas las jarras, se optimizó la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

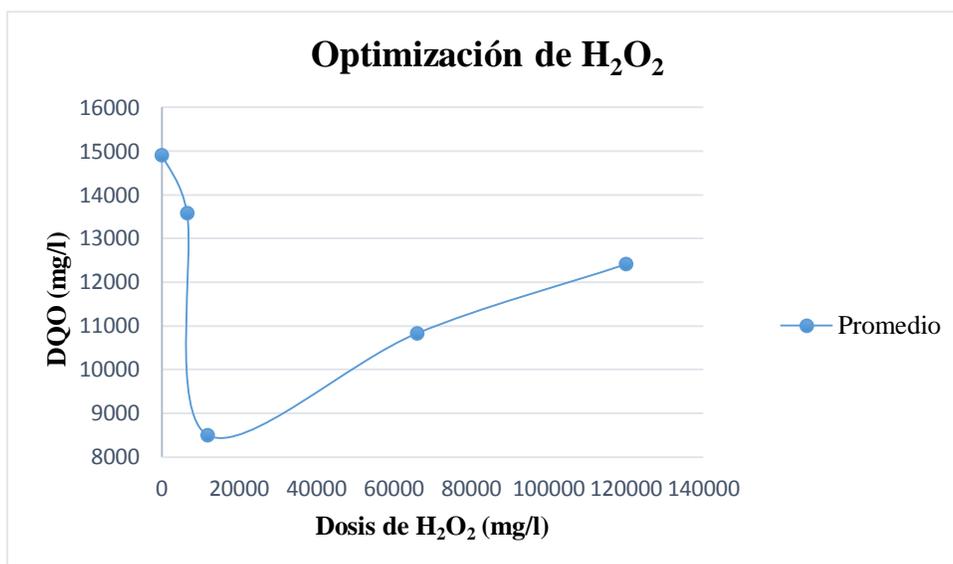
**Tabla 11: Valores de DQO reportados para la primera corrida. Incluidas Repeticiones.**

Número de Jarra	1	2	3	4	5
Dosis de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l)	120	6600	12000	66000	120000
Dosis de FeSO <sub>4</sub> (mg/l)	20000	20000	20000	20000	20000
Valor de DQO (mg/l)	14000	12750	8750	11000	13750
Repetición 1 DQO (mg/l)	14750	13500	6750	10750	12500
Repetición 2 DQO (mg/l)	16000	14500	10000	10750	11000
Promedio	14917	13583	8500	10833	12417

FUENTE: Elaboración Propia.

Cada dosis fue ensayada 3 veces, obteniendo los valores promedio indicados en la última fila de la Tabla 11. La jarra que en promedio alcanzó la mayor reducción de DQO fue la jarra Nro. 3 con dosis de reactivo Fenton; 12000 mg/l de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 20000 mg/l de FeSO<sub>4</sub>. Punto de Inflexión en la Curva. Ver Figura 2.

<sup>19</sup> MANUAL DE ANÁLISIS DE AGUA. HATCH Company. Segunda edición en español. Procedimientos fotométricos para agua residual. Página. 188.



**Figura 2: Curva Dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (mg/l) & DQO (mg/l)**

FUENTE: Elaboración Propia.

#### 4.3.7. Análisis estadístico de los resultados de la corrida - 1

Se realizó el análisis estadístico para verificar la significancia entre los resultados promedio obtenidos y poder reafirmar el valor de 12000 mg/l como valor óptimo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la siguiente etapa del experimento.

Se determinó si existen diferencias significativas entre las medias de DQO correspondientes a las diferentes dosis (120, 6600, 12000, 66000 y 120000) de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (en mg/l), los datos fueron sometidos a la prueba paramétrica ANOVA de un factor. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12: Valoraciones descriptivas de DQO<sub>2</sub> mg/l, derivadas de las pruebas con diferentes dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mg/l.**

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l)	N	Media - DQO <sub>2</sub> mg/l	D.S.
120	3	14916,67	1010,363
6600	3	13583,33	877,971
12000	3	8500,00	1639,360
66000	3	10833,33	144,338
120000	3	12416,67	1376,893
Total	15	12050,00	2494,995

FUENTE: Elaboración Propia. Resultados devueltos por SPSS.

Levene = 1,432; df1 = 4; df2 = 10; p = 0.293

F = 14.533; p = 0.000

El estadístico de Levene, señala que los datos proceden de varianzas similares (p=0.293); y las valoraciones de la prueba ANOVA señala que sí existen diferencias significativas entre las medias evaluadas (p=0.000).

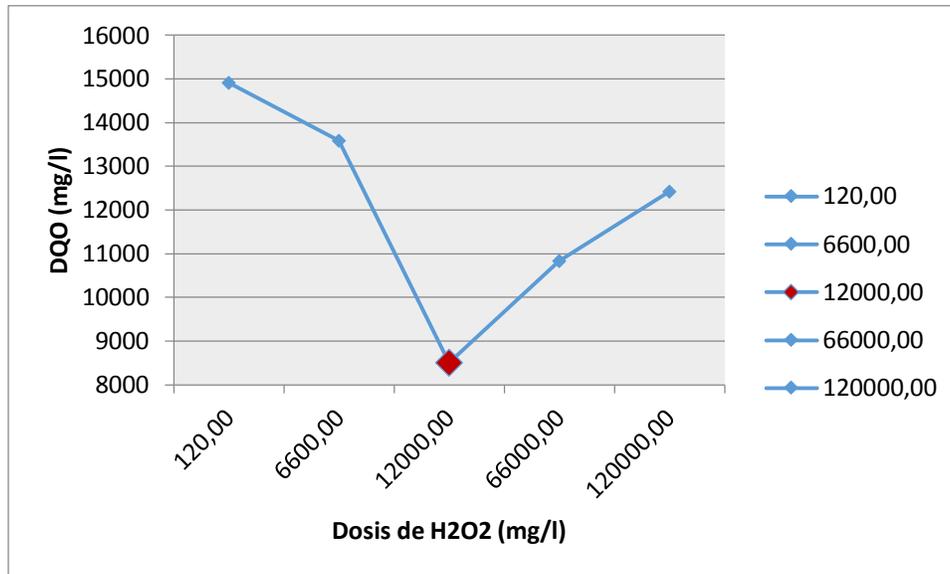
Sobre la base de la existencia de diferencia de medias, se realiza el análisis de comparaciones múltiples, pudiéndose apreciar que cuando la dosis es de 12000 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, las valoraciones de DQO alcanzan los promedios mínimos respecto a las demás dosis. Ver Tabla 13.

**Tabla 13. Pruebas post hoc DMS. Comparaciones múltiples variable dependiente:  
DQO mg/l**

<b>(I) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mg/l</b>	<b>(J) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mg/l</b>	<b>≠ de medias (I-J)</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Sig.</b>
<b>120</b>	6600	1333,333	923,460	0,179
	12000	6416,667*	923,460	0,000
	66000	4083,333*	923,460	0,001
	120000	2500,000*	923,460	0,022
<b>6600</b>	120	-1333,333	923,460	0,179
	12000	5083,333*	923,460	0,000
	66000	2750,000*	923,460	0,014
	120000	1166,667	923,460	0,235
<b>12000</b>	120	-6416,667*	923,460	0,000
	6600	-5083,333*	923,460	0,000
	66000	-2333,333*	923,460	0,030
	120000	-3916,667*	923,460	0,002
<b>66000</b>	120	-4083,333*	923,460	0,001
	6600	-2750,000*	923,460	0,014
	12000	2333,333*	923,460	0,030
	120000	-1583,333	923,460	0,117
<b>120000</b>	120	-2500,000*	923,460	0,022
	6600	-1166,667	923,460	0,235
	12000	3916,667*	923,460	0,002
	66000	1583,333	923,460	0,117

FUENTE: Elaboración Propia. Resultados devueltos por SPSS.

A continuación se puede muestra la Figura 3, con la representación gráfica del punto de inflexión obtenido.



**Figura 3. Representación gráfica de medias de DQO mg/l correspondientes a las diferentes dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mg/l**

FUENTE: Elaboración Propia.

Por lo tanto, es correcto afirmar que 12000 mg/l es el valor óptimo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es decir este fue el nuevo valor fijo para la optimización de FeSO<sub>4</sub> – Corrida 2.

#### **4.4. DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA DE FeSO<sub>4</sub> – CORRIDA 2**

Al igual que en la prueba preliminar, se consideró por corrida 5 jarras con un litro de lixiviado cada una; se presentará el peso dosificado de cada uno de los reactivos aplicados a cada jarra y, los valores de pH y de temperatura monitoreados durante el ensayo. Además se hará apunte de aspectos adicionales importantes a fin de que el lector de esta tesis tenga un entendimiento completo del desarrollo de la investigación.

#### 4.4.1. Peso de Sulfato de Hierro dosificado por jarra

Tabla 14: Peso de FeSO<sub>4</sub> para la corrida 2; valor inicial, repetición 1 y repetición 2.

Nro. De Jarra	Relación Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peso de FeSO <sub>4</sub> (g)		
		Inicial	Repetición 1	Repetición 2
1	0.083	1.0304	1.0429	1.0235
2	0.417	5.0904	5.0255	5.0198
3	0.833	10.0787	10.0575	10.0345
4	1.667	20.0604	20.0442	20.0439
5	3.333	40.3537	40.0369	40.0632

FUENTE: Elaboración Propia.

Los pesos de Sulfato de Hierro dosificados por jarra varían en función a las relaciones Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

#### 4.4.2. Volumen de peróxido de hidrógeno dosificado por jarra

Se consideró la gravedad específica del Peróxido de Hidrógeno 1.2.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> Ficha Técnica Peróxido de Hidrógeno 50% Grado Técnico. Cumpa S.A.S. Insumos y Tecnología para la Industria Alimentaria.

**Tabla 15: Volumen y peso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la corrida 2.**

<b>Nro. De Jarra</b>	<b>Relación Fe/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	<b>Peso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (g)</b>	<b>Volumen de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (ml)*</b>
1	166.67	12	10
2	3.030	12	10
3	1.667	12	10
4	0.303	12	10
5	0.167	12	10

FUENTE: Elaboración Propia.

\* El volumen aplicado por jarra fue el mismo para todas las jarras, valor óptimo determinado en la corrida previa, corrida – 1.

El volumen indicado en la Tabla 15, se dosificó por igual a la prueba inicial y a sus dos repeticiones.

#### **4.4.3. Control de temperatura**

La mezcla ocurrió hasta 20 minutos después a aplicada la dosis de Peróxido de Hidrogeno, concluido este tiempo el equipo de test de jarras se detuvo y se retiraron la jarras del equipo. Por lo tanto, los dos últimos valores de temperatura reportados en la Tabla 16 fueron medidos sin agitación.

**Tabla 16: Control de temperatura e intervalos de medición. Corrida 2.**

Nro. De Jarra	1			2			3			4			5		
Tiempo después de dosificado el H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (min)	I	R1	R2												
0	21	21	19	21	21	19	21	21	19	21	21	19	21	21	19
5	23	24	22	24	25	23	25	26	23	27	28	26	30	31	29
10	23	24	22	24	25	23	25	26	24	27	29	26	31	32	30
15	24	24	24	24	25	24	27	27	26	28	29	28	31	31	31
20	24	24	24	25	25	25	31	29	30	28	29	29	30	31	31
25	23	23	22	24	23	23	30	29	29	27	28	28	29	29	28
30	23	23	20	23	23	22	29	27	28	25	26	26	27	27	27

FUENTE: Elaboración Propia.

I: Corrida 2 - prueba Inicial

R1: Corrida 2 – Repetición 1

R2: Corrida 2 – Repetición 2

La variación de temperatura está relacionada con la dosis de Peróxido de Hidrógeno, mientras mayor es la dosis aplicada la reacción es más exotérmica, manifestándose esto con un mayor incremento de la temperatura. A diferencia de la corrida 1, las temperaturas máximas alcanzadas son de 31°C en la jarra N° 5 – Corrida 2 a los 15 minutos de dosificado el Peróxido de Hidrógeno, versus los 85.3 °C de la jarra N° 5 – Corrida 1, aunque en ambos casos ocurrieron a los 15 minutos de dosificado el Peróxido de Hidrógeno. Se pudo observar que se mantiene el objeto de que a mayor dosis de Peróxido de Hidrógeno mayor es la temperatura máxima alcanzada.

Los tiempos de ocurrencia de la temperatura máxima promedio son independientes de la dosis de Peróxido de Hidrógeno aplicadas, debido a que las temperaturas promedio máximas

alcanzadas ocurren en todas las jarras entre los 15 y 20 minutos; al igual que en todas las jarras de la corrida N° 1.

La jarra 1 alcanzó una temperatura promedio máxima de 24°C, a los 15 minutos de aplicada su dosis de Peróxido y posteriormente la temperatura comenzó a descender; el comportamiento es similar en el resto de jarras; en la N° 2 la temperatura promedio máxima alcanzada fue de 25° C a los 20 minutos de aplicada su dosis de Peróxido, la jarra N° 3 alcanzó 30° C a los 20 minutos, la jarra N° 4 alcanzó 28.7° C a los 20 minutos y la jarra N° 5 alcanzó 31° C entre los 10 y 15 minutos de dosificado el Peróxido de Hidrógeno.

En las jarras N° 4 y N° 5 se presentó espuma flotante durante la agitación; en ambos casos el volumen de la espuma no superaba los 2 mm. No se presentó efervescencia ni burbujeo en ninguna jarra. Ver ANEXO 3 Foto 3.

A este nivel, se pudo observar que optimizando las dosis de ambos reactivos se puede manejar el sistema a presión ambiente y con temperaturas menores; además no se presentaron cambios bruscos en el volumen de la muestra tratada. Todo esto permitirá que el diseño del reactor a mayor escala sea más sencillo y económico, tanto en la instalación como en la operación del mismo.

#### **4.4.4. Neutralización de las muestras y verificación de pH**

Concluidas las 24 horas de reposo de las jarras con muestra tratada se realizó su neutralización, y se verificó en pH conseguido. Ver Tabla 17.

**Tabla 17: Control de pH. Corrida 2.**

<b>Nro. De Jarra</b>	<b>pH</b>		
	<b>Inicial</b>	<b>Repetición 1</b>	<b>Repetición 2</b>
1	6.901	6.783	7.002
2	7.063	6.927	7.034
3	6.959	7.031	6.984
4	7.040	7.405	7.943
5	7.156	7.039	6.993

FUENTE: Elaboración Propia.

Se fueron realizando ajustes del pH agregando un ml de NaOH o uno de muestra ácida en los casos en los que era necesario.

Se consideraron válidos todos los valores contenidos en el rango entre 6.5 y 7.5, debido a que en este pH el hierro es insoluble formándose Hidróxido de Hierro en forma de un lodo voluminoso que posteriormente fue removido por filtración. Ver ANEXO 3 Foto 10.

A la muestra neutralizada se le agregó carbón activado y se dejó actuar, según lo planteado en el Capítulo V.

#### **4.4.5. Filtración de la muestra neutralizada**

Mediante la filtración se retuvo el Hidróxido de Hierro que se formó en la neutralización y el carbón activado previamente dosificado.

Se observa la pérdida casi total de color, sólidos y olor en el producto filtrado, Ver ANEXO 3 Fotos 11 y 13.

#### 4.4.6. Determinación de la DQO

De igual manera que para la Corrida 1, de cada una de las muestras filtradas se realizó una dilución de 1 en 25 para la cuantificación de la DQO.

La cuantificación de la DQO se realizó en un espectrofotómetro marca Hatch haciendo uso de viales de alto rango Plus de la misma marca.

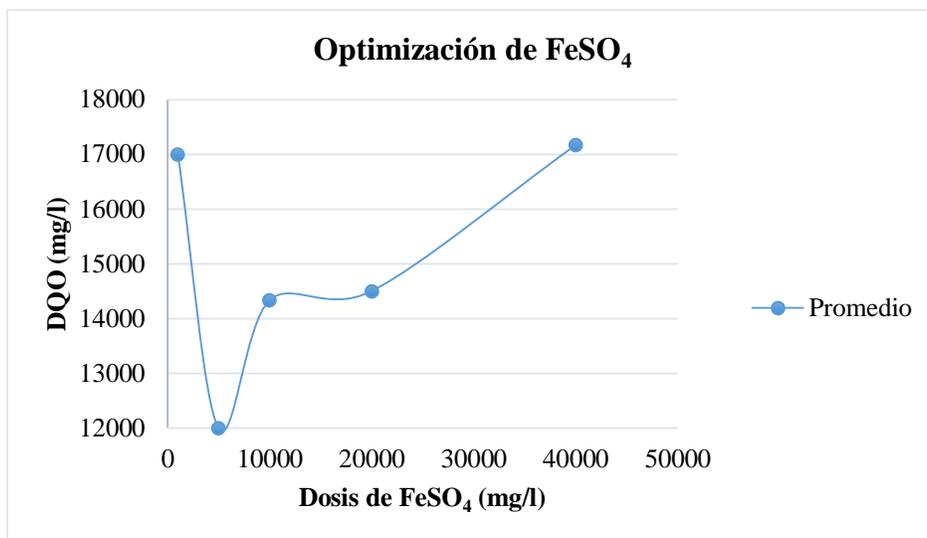
Los resultados de la segunda corrida se reportan en la Tabla 18; como se puede observar se incluyen las dosis de los reactivos aplicadas a cada jarra y los valores de la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> permanecen constantes para todas las jarras, pues se optimizó el FeSO<sub>4</sub>.

**Tabla 18: Valores de DQO reportados para la segunda corrida. Incluidas Repeticiones.**

<b>Número de Jarra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Dosis de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l)	12000	12000	12000	12000	12000
Dosis de FeSO <sub>4</sub> (mg/l)	1000	5000	10000	20000	40000
Valor de DQO (mg/l)	15500	12250	14500	14750	18000
Repetición 1 DQO (mg/l)	15500	12500	14500	15000	16750
Repetición 2 DQO (mg/l)	20000	11250	14000	13750	16750
Promedio	17000	12000	14333	14500	17167

FUENTE: Elaboración Propia.

Cada dosis fue ensayada 3 veces, obteniendo los valores promedio indicados en la última fila de la tabla 18. La jarra que en promedio alcanzó la mayor reducción de DQO fue la jarra Nro. 2 con dosis de reactivo Fenton: 12000 mg/l de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 5000 mg/l de FeSO<sub>4</sub>. Punto de Inflexión de la Curva. Ver Figura 4.



**Figura 4: Curva Dosis de FeSO<sub>4</sub> (mg/l) & DQO (mg/l)**

FUENTE: Elaboración Propia.

#### **4.4.7. Análisis estadístico de los resultados de la corrida - 2**

Con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre las medias de DQO correspondientes a las diferentes dosis (1000, 5000, 10000, 20000 y, 40000) de FeSO<sub>4</sub> (mg/l), los datos fueron sometidos a la prueba paramétrica ANOVA de un factor. Los resultados se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19: Valoraciones descriptivas de DQO<sub>2</sub> mg/l, derivadas de las pruebas con diferentes dosis de FeSO<sub>4</sub> mg/l.**

<b>FeSO<sub>4</sub> (mg/l)</b>	<b>N</b>	<b>Media DQO<sub>2</sub> (mg/l)</b>	<b>D. S.</b>
1000	3	17000,00	2598,076
5000	3	12000,00	661,438
10000	3	14333,33	288,675
20000	3	14500,00	661,438
40000	3	17166,67	721,688
Total	15	15000,00	2261,873

FUENTE: Elaboración Propia.

Levene = 7.975; df1=1; df2=10; p=0.004

F=8.380; p=0.003

La valoración de probabilidad de la prueba de Levene (p=0.004), señala que los datos proceden de varianzas significativamente diferentes; y la valoración de probabilidad de la prueba ANOVA (p=0.004), indica que sí existen diferencias significativas entre las medias evaluadas.

**Tabla 20: Pruebas post hoc Tamhane. Comparaciones múltiples variable dependiente:  
DQO<sub>2</sub>**

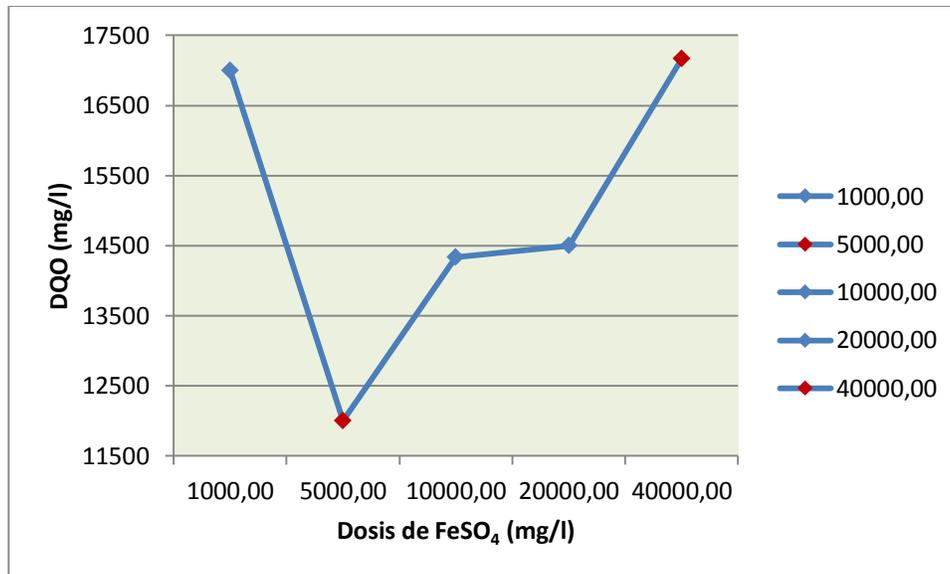
<b>(I) FeSO<sub>4</sub></b>	<b>(J) FeSO<sub>4</sub></b>	<b>≠ de medias (I-J)</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Sig.</b>
<b>1000</b>	5000	5000,000	1547,848	,523
	10000	2666,667	1509,231	,913
	20000	2500,000	1547,848	,930
	40000	-166,667	1556,795	1,000
<b>5000</b>	1000	-5000,000	1547,848	,523
	10000	-2333,333	416,667	,134
	20000	-2500,000	540,062	,094
	40000	-5166,667*	565,194	,008
<b>10000</b>	1000	-2666,667	1509,231	,913
	5000	2333,333	416,667	,134
	20000	-166,667	416,667	1,000
	40000	-2833,333	448,764	,112
<b>20000</b>	1000	-2500,000	1547,848	,930
	5000	2500,000	540,062	,094
	10000	166,667	416,667	1,000
	40000	-2666,667	565,194	,090
<b>40000</b>	1000	166,667	1556,795	1,000
	5000	5166,667*	565,194	,008
	10000	2833,333	448,764	,112
	20000	2666,667	565,194	,090

FUENTE: Elaboración Propia. Resultados devueltos por SPSS.

Sobre la base de la existencia de diferencia de medias, se realiza el análisis de comparaciones múltiples, pudiéndose apreciar que cuando la dosis es de 5000 mg/l FeSO<sub>4</sub>, las valoraciones de DQO alcanzan los promedios mínimos respecto a las demás dosis. A partir de 5000 mg/l de FeSO<sub>4</sub> hasta aproximadamente antes de 40000 mg/l de

FeSO<sub>4</sub> se aprecia disminución del DQO, sin embargo; a partir de los 40000 mg/l de FeSO<sub>4</sub> tiende a incrementarse la carga contaminante.

A pesar de que no existe diferencia significativa entre los valores contenidos entre 5000 mg/l y 40000 mg/l de FeSO<sub>4</sub>, se consideró como el valor óptimo el que devolvió el menor valor de DQO; dosis de FeSO<sub>4</sub> de 5000 mg/l. Ver Figura 5.



**Figura 5: Representación gráfica de medias de DQO mg/l correspondientes a las diferentes dosis de FeSO<sub>4</sub> mg/l**

FUENTE: Elaboración Propia.

#### 4.5. CROMATOGRAFÍA IÓNICA

Se cuantificó el contenido de algunos iones disueltos en el lixiviado con la finalidad de evaluar la evolución en los iones presentes y su relación con la DQO. Se realizó la cromatografía iónica a las siguientes muestras:

- Muestra de lixiviado pura
- Muestra ácida
- Muestras producto de la corrida 1, optimización de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

- Muestras producto de la corrida 2, optimización de FeSO<sub>4</sub>.

Posteriormente, se realizó un análisis de la evolución de los iones en cada etapa del tratamiento de todo el proceso Fenton.

#### 4.5.1. Muestra de lixiviado pura

En la tabla 21 se presentan los resultados de cromatografía iónica para la muestra pura.

**Tabla 21. Resultados cromatografía iónica. Muestra pura.**

Fluoruro	Cloruro	Bromuro	Nitrato	Fosfato	Sulfato	DQO
12.5406	43852	122.3096	122.3036	0	*	57807

FUENTE: Elaboración Propia.

\* No se cuantificó Sulfato en la medición de la muestra pura debido a que se adiciona en el proceso Fenton, y en el momento de la medición no se consideró trascendente.

El proceso Fenton implica una oxidación química muy severa, por lo que se espera que los iones se conviertan a formas oxidadas.

Para el caso del fluoruro, cloruro y bromuro se oxidaron a formas más oxidadas por lo que se espera que en la muestra tratada, se reduzca su concentración con respecto a la concentración en la muestra de lixiviado puro. Para el nitrato, fosfato y sulfato se esperaría que aumente su concentración en la muestra tratada, con relación a la muestra pura debido a que son las formas iónicas más oxidadas; por lo que si la muestra contiene nitrógeno, fosforo y sulfato, la concentración de estos iones en la muestra tratada se incrementará.

Se reportarán los resultados de cromatografía iónica para el primer ensayo de cada corrida, no se realizaron las mediciones para las repeticiones en ningún caso.

#### 4.5.2. Muestras producto de la corrida 1, optimización de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

En la tabla 22 se presentan los resultados de cromatografía iónica para la corrida 1.

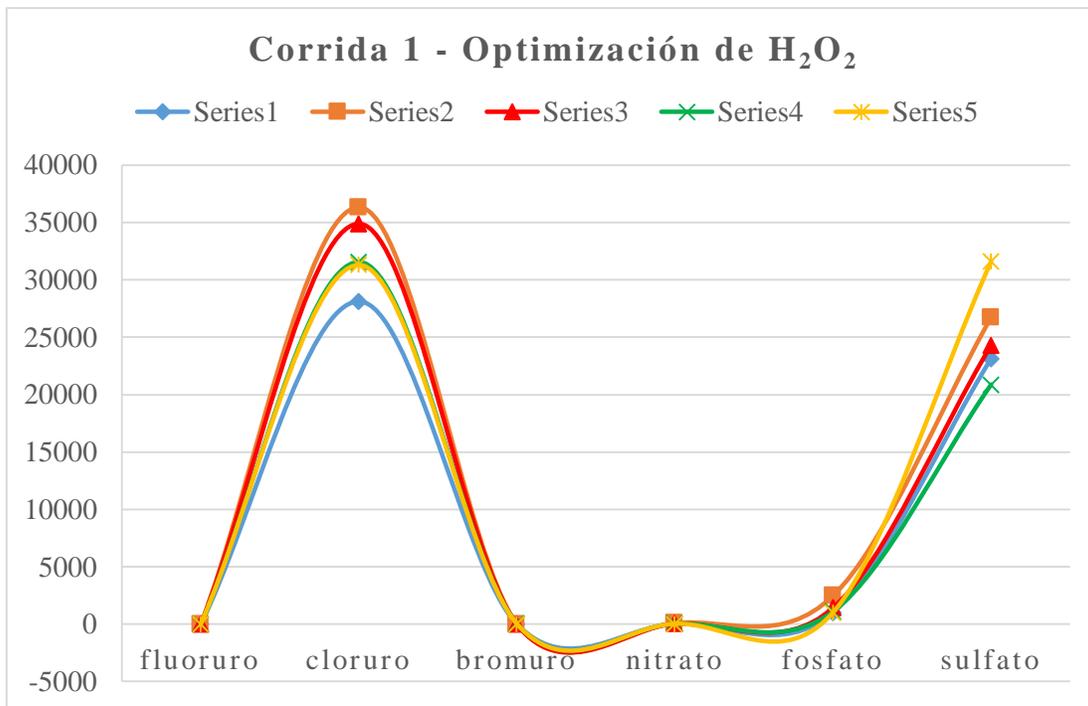
**Tabla 22. Resultados cromatografía iónica. Corrida 1.**

n°	fluoruro	cloruro	bromuro	nitrato	Fosfato	sulfato	DQO
1	0	40218.8991	45.3946	67.2220	0	32340.213	14917
2	0	36963.4662	34.25375	0	231.8218	30008.4303	13583
3	0	31909.1366	17.2532	52.2534	239.7907	35338.4464	8500
4	0	32531.0651	13.55545	42.727	258.55025	26174.925	10833
5	4.67575	33230.5683	21.2890	26.2994	174.3194	26813.8174	12417

FUENTE: Elaboración Propia.

Los resultados responden correctamente a lo teóricamente esperado, los iones de fluoruro, cloruro y bromuro se oxidaron, por lo que se reduce su concentración en las muestras tratadas con relación a la muestra pura, y los iones; nitrato, fosfato y sulfato incrementan su concentración por ser las formas más oxidadas.

El comportamiento de los iones responde a la reducción de DQO en la mayoría de los casos, mientras menor valor de DQO obtenido post tratamiento, mayor concentración de las formas oxidadas y menor concentración de formas reducidas. Con lo que sustenta la eficiencia del tratamiento. Ver Figura 6.



Leyenda		
N° de Serie	Color de Serie	DQO
1	Celeste	14917
2	Anaranjado	13583
3	Rojo	8500
4	Verde	10833
5	Amarillo	12417

**Figura 6: Variación de iones disueltos. Corrida 1.**

FUENTE: Elaboración Propia.

Se puede observar en la Figura 6, que la variación entre iones es bastante sutil, no se realizó un análisis estadístico que respalde si existe o no diferencia significativa entre los valores devueltos por cada ion en cada jarra de esta corrida porque se estableció como determinante para la toma de decisiones el menor valor de DQO; sin embargo, todos los iones obedecen el comportamiento esperado con relación a la muestra sin tratar y con relación a la DQO.

Para el caso de la jarra y serie N°3, jarra que devolvió el menor valor de DQO y escogida como el valor óptimo de tratamiento (dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 12000 mg/l y dosis de FeSO<sub>4</sub> 20000 mg/l), en los iones fluoruro, cloruro, bromuro y sulfato, devuelve los valores más extremos. Las menores concentraciones para las formas reducidas y las mayores concentraciones para las formas oxidadas.

#### 4.5.3. Muestras producto de la corrida 2, optimización de FeSO<sub>4</sub>

En la tabla 23 se presentan los resultados de cromatografía iónica para la corrida 1.

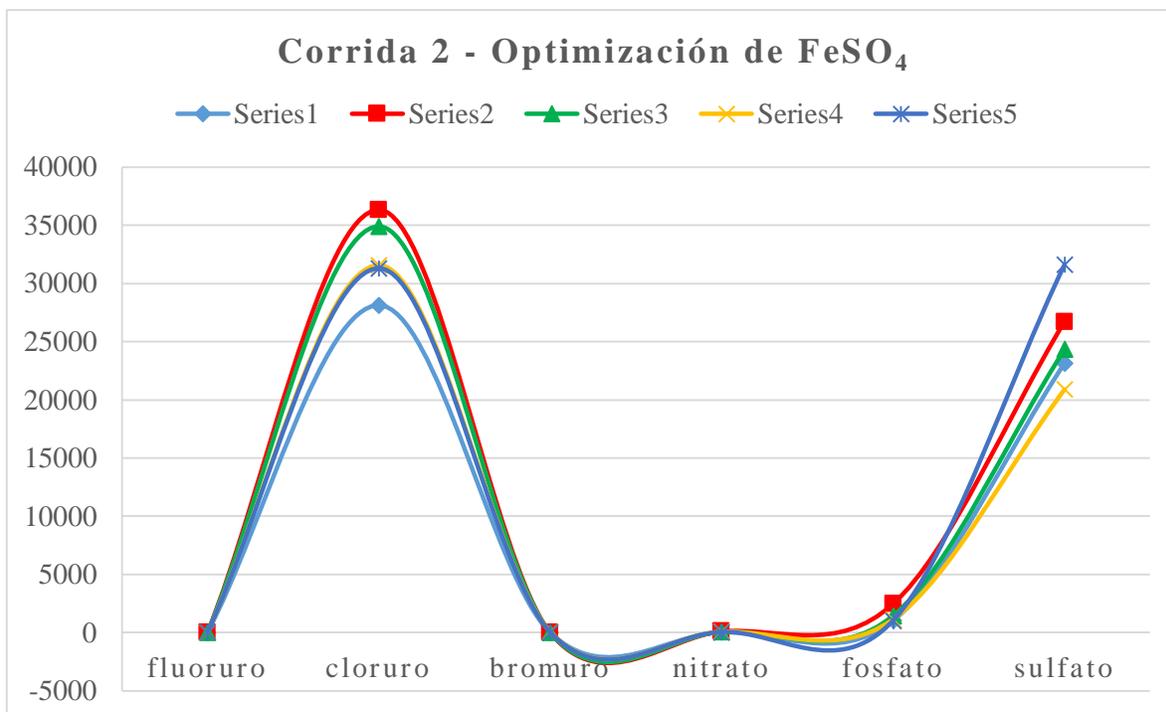
**Tabla 23. Resultados cromatografía iónica. Corrida 2.**

n°	fluoruro	cloruro	bromuro	nitrato	fosfato	Sulfato	DQO
1	0	28112.6273	0	36.8080	1029.8254	23142.4871	15500
2	0	36309.8221	0	105.2641	2478.7907	26724.8852	12250
3	0	34892.1192	0	55.7357	1447.456	24323.2131	14500
4	0	31546.0142	46.3335	44.1042	1114.8355	20881.4492	14750
5	0	31321.9473	0	23.4903	1016.5286	31643.632	18000

FUENTE: Elaboración Propia.

Los resultados responden correctamente a lo teóricamente esperado, los iones de fluoruro, cloruro y bromuro se oxidaron, por lo que se reduce su concentración en las muestras tratadas con relación a la muestra pura, y los iones; nitrato, fosfato y sulfato incrementan su concentración por ser las formas más oxidadas.

El comportamiento de los iones responde a la reducción de DQO en la mayoría de los casos, mientras menor valor de DQO, mayor concentración de las formas oxidadas y menor concentración de formas reducidas. Con lo que sustenta la eficiencia del tratamiento propuesto. Ver Figura 7.



Leyenda		
N° de Serie	Color de Serie	DQO
1	Celeste	1550
2	Rojo	12250
3	Verde	14500
4	Amarillo	14750
5	Azul	18000

**Figura 7: Variación de iones disueltos. Corrida 2.**

FUENTE: Elaboración Propia.

Para el caso de la jarra y serie N° 2, jarra que devolvió el menor valor de DQO y escogida como el valor óptimo de tratamiento (dosis de FeSO<sub>4</sub>, 12000 mg/l y dosis de FeSO<sub>4</sub> 5000 mg/l), en los iones fluoruro, bromuro, nitrato, fosfato y sulfato, devuelve los valores más extremos. Las menores concentraciones para las formas reducidas y las mayores concentraciones para las formas oxidadas.

#### 4.5.4. Etapas del experimento. Análisis de la evolución de cada ión

En la Tabla 24, se reporta los resultados de cromatografía de 6 muestras, cada una tomada en una etapa del tratamiento Fenton. Se realizará el análisis de la evolución de los iones en cada etapa.

**Tabla 24. Resultados cromatografía iónica. Ciclo del proceso Fenton**

Nombre Muestra	fluoruro	cloruro	bromuro	nitrato	fosfato	Sulfato
Pura	12.5406	43852	122.3096	122.3036	0	*
Acidificada	0	57516.607	72.0218	180.3857	0	34387.6392
Ácida + FeSO <sub>4</sub>	0	60523.2472	79.5744	84.6801	0	39066.4875
Tratada ácida	0	36466.7475	0	115.8816	0	24165.7457
Tratada neutralizada	0	43053.0664	80.9702	41.9878	0	29464.197
Filtrada **	0	27837.2442	0	74.4683	0	20253.333

FUENTE: Elaboración Propia.

\* No se cuantificó en la medición de la muestra pura debido a que se adiciona en el proceso Fenton.

\*\* Los resultados presentados fueron los de la corrida realizada para la caracterización final del lixiviado tratado, muestras que se enviaron a Certimín

La concentración de los iones varía en cada etapa del tratamiento; para el fluoruro se entiende que en la acidificación de la muestra se oxida completamente y desaparece<sup>21</sup> hasta el final del tratamiento.

<sup>21</sup> Desaparece, o llega a valores por debajo del límite de detección del equipo cromatógrafo iónico.

El cloruro incrementa su concentración en las muestras acidificadas, alcanza un valor máximo de 60523.25 mg/l en la dosificación del Sulfato de Hierro y se va reduciendo hasta 27837.24 mg/l. La concentración de cloruros en la muestra tratada se redujo en 54%.

El bromuro va fluctuando en el tratamiento, desde la acidificación inicial se reduce su concentración en 41% hasta que en la muestra filtrada desaparece completamente.

En adelante se espera que las especies restantes aumenten por ser las formas más oxidadas; sin embargo, el nitrato no cumple con esta norma. Esto como resultado de la formación de nuevos compuestos químicos disueltos en la muestra tratada.

En la Tabla 24 se puede observar que, para la totalidad de las muestras, la concentración de fosfato es nula; sin embargo, en tablas anteriores (corridas 1 y 2) si se reportaron valores de concentración entre 1000 y 2000 mg/l, esto podría haber ocurrido debido a que en la limpieza de los instrumentos de laboratorio se hizo uso de jabón líquido común, cuando lo conveniente hubiera sido utilizar detergente no iónico.

No es posible concretar el análisis del ion sulfato debido a que no se cuenta con el valor de la concentración de este ion en la muestra pura.

#### **4.6. CARACTERIZACIÓN FINAL DE LIXIVIADO TRATADO**

La dosis óptima de reactivo Fenton que resultó de las corridas 1 y 2, después de la optimización de Peróxido de Hidrógeno y Sulfato de Hierro, fue replicada hasta conseguir un volumen de muestra tratada filtrada de 9 litros (ver ANEXO 3 Foto 19); volumen necesario para el llenado de frascos que serían enviados al laboratorio certificado para la caracterización final del lixiviado tratado. Estos resultados permitieron determinar la eficiencia del tratamiento no solo en términos de DQO, sino con todo el resto de parámetros físico-químicos evaluados.

Las muestras fueron entregadas el 23 de junio del 2016. Las muestras perecibles fueron analizadas dentro de las 24 horas. Informe Final de resultados emitido por Certimín. Ver ANEXO 1.

En las Tablas 25 y 26, se reportan los resultados obtenidos de esta caracterización final.

**Tabla 25: Resultados caracterización final del lixiviado**

<b>SAMPLE</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>MIN DETECTION</b>	<b>Única</b>	<b>Blank</b>
<b>Fecha</b>	Monitoreo		14/04/2016 12:05	
<b>Tipo</b>	Muestra		Agua de Proceso	
<b>Cl-</b>	mg/L	1	30861	<1
<b>Turbidez</b>	NTU	1	3.5	<1.0
<b>Conductividad</b>	µS/cm		98500	
<b>SST</b>	mg/L	5	48	
<b>AcyG</b>	mg/L	0.5	<0.5	
<b>Dureza Total</b>	mg CaCO <sub>3</sub> /L	1	2252	
<b>DBO</b>	mg/L	2	883.33	<2.00
<b>DQO</b>	mg/L	10	12838.54	

FUENTE: Elaboración Propia.

**Tabla 26: Resultados Caracterización Final del Lixiviado. Metales Totales**

<b>SAMPLE</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>MIN DETECTION</b>	<b>Única</b>	<b>Blank</b>
<b>Hg(t)</b>	mg/L	0.0001		<0.0001
<b>Ag(t)</b>	mg/L	0.002	<0.002	<0.002
<b>Al(t)</b>	mg/L	0.02	0.15	<0.02
<b>As(t)</b>	mg/L	0.008	0.154	<0.008
<b>Ba(t)</b>	mg/L	0.001	0.014	<0.001
<b>Be(t)</b>	mg/L	0.0003	<0.0003	<0.0003
<b>Bi(t)</b>	mg/L	0.02	<0.02	<0.02
<b>B(t)</b>	mg/L	0.003	27.781	<0.003
<b>Ca(t)</b>	mg/L	0.05	174.34	<0.05
<b>Cd(t)</b>	mg/L	0.001	1.099	<0.001
<b>Ce(t)</b>	mg/L	0.02	0.03	<0.02
<b>Co(t)</b>	mg/L	0.002	0.122	<0.002
<b>Cr(t)</b>	mg/L	0.004	0.247	<0.004
<b>Cu(t)</b>	mg/L	0.003	0.031	<0.003
<b>Fe(t)</b>	mg/L	0.01	1.2	<0.01
<b>K(t)</b>	mg/L	0.01	1160.74	<0.01
<b>Li(t)</b>	mg/L	0.004	6.028	<0.004
<b>Mg(t)</b>	mg/L	0.02	450.77	<0.02
<b>Mn(t)</b>	mg/L	0.001	5.278	<0.001
<b>Mo(t)</b>	mg/L	0.004	0.112	<0.004
<b>Na(t)</b>	mg/L	0.01	>2250	<0.01
<b>Ni(t)</b>	mg/L	0.002	1.949	<0.002
<b>P(t)</b>	mg/L	0.06	378.83	<0.06
<b>Pb(t)</b>	mg/L	0.01	0.01	<0.01
<b>Sb(t)</b>	mg/L	0.008	0.008	<0.008
<b>Se(t)</b>	mg/L	0.02	<0.02	<0.02

Continuación

<b>SiO2(t)</b>	mg/L	0.02	31.22	<0.02
<b>Sn(t)</b>	mg/L	0.007	0.205	<0.007
<b>Sr(t)</b>	mg/L	0.0007	1.1345	<0.0007
<b>Ti(t)</b>	mg/L	0.01	0.01	<0.01
<b>Tl(t)</b>	mg/L	0.05	<0.05	<0.05
<b>V(t)</b>	mg/L	0.003	0.04	<0.003
<b>Zn(t)</b>	mg/L	0.005	0.972	<0.005

FUENTE: Elaboración Propia.

A continuación se realizará el análisis de los resultados reportados. Este análisis se dividirá en tres partes:

Para el primera parte se realizará una comparación entre los resultados obtenidos, con el Proyecto de Decreto Supremo Límites Máximos Permisibles para Efluentes de Infraestructuras de Residuos Sólidos del MINAM<sup>22</sup> (ANEXO 2) y con la legislación vigente de Chile para emisión a un cuerpo de agua de Lixiviados de Rellenos de Seguridad (ANEXO 4); con el objetivo de analizar las diferencias entre ellos y en qué parámetros se excederían ambas normas.

En segundo lugar, se realizará la comparación entre las concentraciones del lixiviado puro y las del lixiviado tratado; además de que se evaluará el porcentaje de remoción post el tratamiento, para cada parámetro.

Y por último, se realizará la comparación de los porcentajes de eficiencia logrados en la presente investigación, con los de los tratamientos de los lixiviados reportados en la investigación de Méndez et. Al. (2010).

<sup>22</sup> MINAM: Ministerio del Ambiente. Perú.

#### 4.6.1. Comparación con el proyecto de DS LMP para infraestructuras de residuos sólidos y la legislación vigente de Chile para emisión a un cuerpo de agua de lixiviados de rellenos

Nuestro país no cuenta con legislación vigente para efluentes de rellenos sanitarios, ni de rellenos de seguridad, solo existe el proyecto de DS LMP para infraestructuras de residuos sólidos que fue propuesto por el MINAM en el año 2009, pero aún no se ha promulgado.

No todos los parámetros analizados en la caracterización final están contemplados en este proyecto; sin embargo, se realizará el análisis con los parámetros que están disponibles en la norma.

**Tabla 27: Comparación de los resultados del lixiviado tratado con el proyecto de LMP**

Parámetro	Unidad	LPM	Resultado Certimín
pH		6.5-8.5	
SST	mg/l	30	48
DQO	mg/l	120	12838.54
DBO	mg/l	20	883.33
<b>Hidrocarburos Totales de Petróleo</b>		10	
Amonio	mg/l	10	
Arsénico Total	mg/l	0.1	0.154
Cadmio Total	mg/l	0.1	1.099
<b>Cobre Total</b>	<b>mg/l</b>	<b>0.5</b>	<b>0.031</b>
Cromo VI (*)	mg/l	0.1	0.247
<b>Hierro Total</b>	<b>mg/l</b>	<b>2</b>	<b>1.2</b>
Mercurio Total	mg/l	0.01	
<b>Plomo Total</b>	<b>mg/l</b>	<b>0.5</b>	<b>0.01</b>
Zinc Total	mg/l	0.5	0.972
Coliformes Totales	NMP/100ml	1000	

FUENTE: Elaboración Propia.

Los parámetros sombreados son los únicos que alcanzan un valor inferior al de la norma, el resto conserva valores muy por encima de los máximos permitidos.

Se debe hacer una observación importante con respecto a los parámetros que incluye el Proyecto de Decreto Supremo, Límites Máximos Permisibles para Efluentes de Infraestructuras de Residuos Sólidos, y los valores que reporta como máximos para los parámetros incluidos; debido a que esta norma está dirigida a lixiviados de rellenos sanitarios y lixiviados de rellenos de seguridad en una sola norma, lo cual no es muy razonable, debido a que las características del lixiviado generado en cada caso son muy diferentes. En el lixiviado de un depósito de seguridad se van a arrastrar los contaminantes propios de los residuos peligrosos, en cambio en el lixiviado de un relleno sanitario, bien gestionado, no debería existir DQO muy elevada ni presencia de metales.

A continuación, se compararán los valores reportados en la Tabla 7, con las concentraciones máximas permitidas en la legislación chilena.

Se eligió hacer la comparación de los resultados obtenidos con la legislación chilena, debido a que la normativa vigente que aplica a los lixiviados de un relleno de seguridad, es bastante detallada y específica según el tipo de cuerpo de agua en el que se realizará el vertimiento, las concentraciones máximas de los parámetros que regula la norma están diferenciados para vertimientos en aguas fluviales, lacustres, marino costeras; y además, considera los factores de dilución según cada cuerpo receptor. En este caso se realizará la comparación con los Límites Máximos Permitidos para la descarga de residuos líquidos industriales a cuerpos de agua fluviales.

El decreto 148 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile que aprueba el reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos, indica en su artículo 62; *“Todo relleno de seguridad en que se generen líquidos lixiviados deberá cumplir con las normas vigentes sobre residuos industriales líquidos, en caso contrario deberá contemplar una planta de tratamiento de lixiviados, conectada al sistema de recolección de éstos líquidos. En caso de que la planta de tratamiento genere efluentes, éstos deberán cumplir con dichas normas. El material generado y/o removido por estas plantas, deberá ser manejado como un residuo peligroso.”* Por lo tanto, los límites máximos permitidos que aplican al lixiviado de un depósito de seguridad son los definidos en el Decreto 90 del Ministerio del Medio Ambiente

de Chile, que establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Ver ANEXO 4.

En la Tabla 28, se incluye la comparación entre el LMP de Chile, el Proyecto DS LMP para efluentes de Infraestructura de Residuos Sólidos de Perú y los resultados de la presente investigación.

**Tabla 28. Comparación del LMP de Chile con el proyecto DS LMP para efluentes de infraestructura de residuos sólidos de Perú y los resultados de la presente investigación**

Parámetro	Unidad	LMP Chile	LMP Perú	Resultado Certimín
Aceites y Grasas	mg/l	20		<0.5
Aluminio	mg/l	5		0.15
Arsénico	mg/l	0.5	0.1	0.154
Boro	mg/l	0.75		27.781
Cadmio	mg/l	0.01	0.1	1.099
Cianuro	mg/l	0.2		
Cloruros	mg/l	400		30861
Cobre Total	mg/l	1		0.247
Termotolerantes	NMP/100 ml	1000		
Indice de Fenol	mg/l	0.5		
Cromo Hexavalente	mg/l	0.05	0.1	0.247
DBO5	mg O2/l	35	20	883.33
Fósforo	mg/l	10		378.83
Fluoruro	mg/l	1.5		
Hidrocarburos Fijos	mg/l	10	10	
Hierro Disuelto	mg/l	5		
Manganeso	mg/l	0.3		5.278
Mercurio	mg/l	0.001	0.01	
Molibdeno	mg/l	1		0.112

Continuación...

Níquel	mg/l	0.2		1.949
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/l	50		
Pentaclorofenol	mg/l	0.009		
PH	Unidad	6.0 - 8.5		
Plomo	mg/l	0.05	0.5	0.01
Poder Espumógeno	MM	7		
Selenio	mg/l	0.01		<0.02
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	80	30	48
Sulfatos	mg/l	1000		
Sulfuros	mg/l	1		
Temperatura	°C	35		
Tetracloroetano	mg/l	0.04		
Tolueno	mg/l	0.7		
Triclorometano	mg/l	0.2		
Xileno	mg/l	0.5		
Zinc	mg/l	3	0.5	0.972
DQO	mg/l		120	12838.54
Amonio	mg/l		10	
Cromo Total	mg/l		0.5	0.031
Hierro Total	mg/l		2	1.2

FUENTE: Elaboración Propia.

La norma chilena contempla muchos más parámetros que el proyecto peruano y los parámetros son específicos para un depósito de seguridad, no como en el caso del proyecto peruano, que se considera una sola norma para rellenos sanitarios y rellenos de seguridad.

Se puede observar que solamente para el Arsénico, DBO5, SST y Zinc el proyecto peruano es más restrictivo que la norma Chilena, para el resto de parámetros la norma chilena exige concentraciones menores.

Los resultados de la presente investigación cumplirían solamente con los parámetros; aceites y grasas, cobre total, plomo y arsénico. Para el resto de parámetros se supera la norma.

El lixiviado en estudio requiere un tratamiento posterior para que cumpla con la legislación vigente analizada.

#### 4.6.2. Comparación con la caracterización inicial. Porcentaje de remoción de contaminantes

En la Tabla 29 se incluyen los resultados de los parámetros analizados en la muestra pura y en la muestra tratada, además en la última columna se incluye el porcentaje de remoción logrado por cada parámetro.

**Tabla 29: Comparación de resultados pre y post tratamiento. Eficiencias de remoción.**

Muestra	Unidades	Lixiviado Puro	Lixiviado Tratado	Porcentaje de Remoción
Cl-	mg/L	43852	30861	29.62%
Turbidez	NTU	4000	3.5	99.91%
Conductividad	μS/cm		98500	
SST	mg/L		48	
AcyG	mg/L		<0.50	
Dureza Total	mg CaCO <sub>3</sub> /L		2252	
DBO	mg/L	31813.33	883.33	97.22%
DQO	mg/L	57807	12838.54	77.79%

FUENTE: Elaboración Propia.

La hipótesis planteada para esta investigación perseguía alcanzar una remoción de DQO superior al 70% después de la optimización de los parámetros de tratamiento.

Se alcanzó un porcentaje de remoción de DQO de 77.79%, superando positivamente la hipótesis planteada en aproximadamente 8%. Además la DBO se redujo en 97.22%.

La turbidez fue removida en 99.91%. El lixiviado puro es de color negro, muy viscoso, oleoso, de un aroma intenso y muy desagradable; sin embargo, la muestra tratada tiene un

color ligeramente amarillo, no es grasosa, está libre de sólidos y no tiene aroma. Los sólidos que permanecen en la muestra tratada podrán ser retenidos con un sistema de filtración más eficiente y una mayor concentración de carbón activado para remover el color residual.

El contenido de cloruros se redujo solamente en 29.62%, aspecto también observado en el análisis de cromatografía iónica, lo que indica que la metodología de tratamiento no remueve este tipo de sales disueltas, un tratamiento posterior podría implicar el uso de membranas de ósmosis inversa. La cifra reportada difiere de la que se reporta por cromatografía iónica, debido a que se cuantificaron por métodos distintos.

La Conductividad, los SST, los Aceites y Grasas, y la Dureza Total no fueron evaluados en la caracterización inicial; sin embargo fueron analizados en la muestra tratada para contar con un valor referente para investigaciones posteriores; y como respaldo para evidenciar la pérdida de las características iniciales de la muestra (color, contenido de grasa).

En la Tabla 30 se incluyen los resultados de los metales totales analizados en la muestra pura y la muestra tratada, además en la última columna se incluye el porcentaje de remoción logrado por cada parámetro.

**Tabla 30: Comparación de resultados pre y post tratamiento. Eficiencias de remoción. Metales Totales**

<b>Muestra</b>	<b>Unidades</b>	<b>Lixiviado Puro</b>	<b>Lixiviado Tratado</b>	<b>Porcentaje de Remoción</b>
<b>Hg(t)</b>	mg/L	0.0027		
<b>Ag(t)</b>	mg/L	<0.002	<0.002	
<b>Al(t)</b>	mg/L	3.38	0.15	95.56%
<b>As(t)</b>	mg/L	5.351	0.154	97.12%
<b>Ba(t)</b>	mg/L	0.547	0.014	97.44%
<b>Be(t)</b>	mg/L	<0.0003	<0.0003	
<b>Bi(t)</b>	mg/L	<0.02	<0.02	
<b>B(t)</b>	mg/L	75.035	27.781	62.98%
<b>Ca(t)</b>	mg/L	811.48	174.34	78.52%
<b>Cd(t)</b>	mg/L	16.679	1.099	93.41%

Continuación...

<b>Ce(t)</b>	mg/L	<0.02	0.03	
<b>Co(t)</b>	mg/L	0.389	0.122	68.64%
<b>Cr(t)</b>	mg/L	1.521	0.247	83.76%
<b>Cu(t)</b>	mg/L	1.024	0.031	96.97%
<b>Fe(t)</b>	mg/L	261.79	1.2	99.54%
<b>K(t)</b>	mg/L	1522.31	1160.74	23.75%
<b>Li(t)</b>	mg/L	6.536	6.028	7.77%
<b>Mg(t)</b>	mg/L	959.42	450.77	53.02%
<b>Mn(t)</b>	mg/L	25.749	5.278	79.50%
<b>Mo(t)</b>	mg/L	0.796	0.112	85.93%
<b>Na(t)</b>	mg/L	> 2250.00	> 2250.00	
<b>Ni(t)</b>	mg/L	4.647	1.949	58.06%
<b>P(t)</b>	mg/L	20.36	378.83	-1760.66%
<b>Pb(t)</b>	mg/L	5.2	0.01	99.81%
<b>Sb(t)</b>	mg/L	1.103	0.008	99.27%
<b>Se(t)</b>	mg/L	<0.02	<0.02	
<b>SiO<sub>2</sub>(t)</b>	mg/L	55.85	31.22	44.10%
<b>Sn(t)</b>	mg/L	<0.007	0.205	
<b>Sr(t)</b>	mg/L	5.5254	1.1345	79.47%
<b>Ti(t)</b>	mg/L	0.5	0.01	98.00%
<b>Tl(t)</b>	mg/L	<0.05	<0.05	
<b>V(t)</b>	mg/L	3.264	0.04	98.77%
<b>Zn(t)</b>	mg/L	38.934	0.972	97.50%

FUENTE: Elaboración Propia.

En los metales se puede observar dos comportamientos principalmente; los que alcanzaron eficiencias de remoción de la carga contaminante superiores a 95%, y los que presentan disminución del parámetro después del tratamiento, pero en menor magnitud.

Los metales que presentaron una eficiencia de remoción superior al 95% fueron:

- Aluminio
- Arsénico
- Bario
- Cadmio
- Cobre
- Hierro
- Plomo
- Antimonio
- Titanio
- Vanadio
- Zinc

Los que presentan reducción de la concentración aunque en porcentajes menores son:

- Boro
- Calcio
- Cobalto
- Cromo
- Potasio
- Litio
- Magnesio
- Manganeso
- Molibdeno
- Níquel
- Estroncio

Ocurrió un caso particular con el fósforo total de la muestra tratada en relación a la muestra pura; su concentración se incrementó en 1760.66% en el análisis posterior al tratamiento. Este notable incremento del fósforo total ocurre debido a que lavado de los instrumentos de laboratorio se realizó utilizando jabón líquido común y no detergente iónico como hubiera sido conveniente.

El efecto producido en el fósforo ya fue observado y comentado en los resultados del análisis de cromatografía iónica.

### **4.6.3. Comparación con la investigación de Méndez et al. 2010**

En este punto se realizará una comparación de los resultados reportados en esta investigación con los presentados en la investigación de Méndez et al. (2010). Con la finalidad de comparar la eficiencia en la remoción de DQO según el índice de biodegradabilidad y las dosis de reactivo Fenton aplicadas.

La investigación de Méndez et al. (2010). Compara la calidad del lixiviado antes y después de aplicar el proceso Fenton, en 7 rellenos sanitarios del mundo.

En la Tabla 31, se muestran los resultados de Méndez et al. (2010). Y los resultados obtenidos en la presente investigación.

**Tabla 31: Comparación de los resultados obtenidos con los de la investigación de Méndez et al.**

Parámetro	Unidad	Mérida	Italia	Delaware, USA	Hong Kong	España 1	Estambul	España 2	Perú
<b>pH</b>	Unidades de pH	8.57	8.2	6.67	8.5	-	7.3	7.1	7.534
<b>DQO</b>	mg/l	9080	10540	8596	1500	8100	20700	7100	57807
<b>DBO</b>	mg/l	647	2300		75	475	12200	6500	31813
<b>DBO/DQO</b>	---	0.071	0.218	0	0.050	0.059	0.589	0.915	0.550
<b>Valores óptimos</b>									
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	mg/l	600	1000	2250	200	34000	2000	6500	12000
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	mg/l	1000	830	2792	300	558	1000	650	5000
<b>Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	---	1.667	0.83	1.241	1.5	0.016	0.5	0.1	0.417
<b>Resultados obtenidos</b>									
<b>DQO</b>	mg/l	2088.4	4216	3352.44	450	1620	3105	1775	12838.54
<b>DBO</b>	mg/l	362.32	-	-	-	-	-	130	883.33
<b>Eficiencia alcanzada</b>									
<b>DQO</b>	%	77	60	61	70	80	85	75	77.8
<b>DBO</b>	%	44	-	-	-	-	-	98	97.2

FUENTE: Elaboración Propia.

Como era de esperarse la carga contaminante del lixiviado tratado en la presente tesis, es mucho mayor que la del resto de lixiviados analizados, debido a que los otros 7 reportados pertenecen a rellenos sanitarios, a diferencia del lixiviado estudiado en esta tesis, que pertenece a un depósito de seguridad; sin embargo, se consideró como referente, porque se trabajó con el índice de biodegradabilidad como factor de decisión del rango de dosis a aplicar.

La comparación de los resultados se realizó con lixiviados de rellenos sanitarios que son tratados por el proceso Fenton, debido a que se carece de información disponible para lixiviados de depósitos de seguridad; sin embargo, la comparación es válida, debido a que el efluente de un depósito de seguridad es mucho más complejo en su composición y presenta una carga orgánica de más del doble de la que presenta un relleno sanitario.

En la Tabla 31, se puede observar que el relleno sanitario de Estambul presenta el índice de biodegradabilidad más similar al del lixiviado en estudio, lo que permitió establecer el rango de dosis que se probó para la optimización de los reactivos que componen el proceso Fenton.

Se alcanzó una eficiencia de remoción de DQO de 77.79%, valor que se encuentra en la mitad superior de todas las eficiencias presentadas, lo que respalda que la presente investigación ofrece resultados acorde a los parámetros de tratamiento con los que operan plantas de tratamiento de lixiviado internacionalmente.

La eficiencia de remoción de DBO fue de 97.2%. Solo se cuenta con los valores de DBO de dos rellenos sanitarios: el de Mérida y el de España 2, en el primero se alcanzó una eficiencia solamente de 44 % en la remoción de este parámetro, y el de España alcanza una remoción ligeramente superior a la lograda en esta investigación, 98% de remoción de DBO.

## V. CONCLUSIONES

1. La dosis óptima de reactivo Fenton que generó la mayor reducción de DQO del lixiviado del depósito de seguridad de Befesa Perú S.A; es 12000 mg/l de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y 5000 mg/l de  $\text{FeSO}_4$ .
2. La relación óptima de  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  que permitió obtener la mayor remoción de DQO del lixiviado del depósito de seguridad del Befesa Perú S.A, es 0.417.
3. Se evidenció la degradación de la materia orgánica contenida en el lixiviado mediante la reducción de la DQO en 77.79 % y de la DBO en 97.2%.
4. Se consiguió una notable reducción en la concentración de los metales totales después del tratamiento, para; aluminio, arsénico, bario, cadmio cobre, hierro, plomo, antimonio, titanio, vanadio y zinc; la remoción es superior al 95%.
5. El análisis de cromatografía iónica demostró que mientras mayor es la remoción de DOQ, mayor es la concentración de iones oxidados y menor la de iones reducidos en la muestra tratada.
6. La metodología aplicada promueve el reúso de residuos ácidos que solían ser desechados, como insumo para alcanzar el pH óptimo del tratamiento Fenton.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Al desarrollar un estudio de tratamiento de agua residual o lixiviados, se recomienda realizar una prueba preliminar de dosis de los reactivos a utilizar, probando dosis contenidas en un rango bastante amplio a fin de ajustar el rango hasta valores que ofrezcan diferencia significativa de los resultados.
2. La cuantificación de la DQO se debe realizar en muestras neutras debido a que la DQO es un factor que no solo cuantifica la carga orgánica, sino que se ve alterada por los iones reducidos disueltos, que en la realización del ensayo se van a oxidar consumiendo oxígeno lo que incrementará la DQO (con la muestra ácida). Para evitar esa interferencia, se debe realizar la medición en la muestra neutra.
3. Cuantificar el contenido de cloruros en la muestra a ser evaluada para evitar las interferencias. Se puede medir la DQO por el método convencional de reflujo cerrado por espectrofotometría haciendo uso de viales de alto rango Plus marca Hatch; que controla la interferencia; además de manejar las concentraciones de iones interferentes mediante diluciones.
4. El valor devuelto por el espectrofotómetro cuando se cuantifica la muestra con viales de alto rango Plus marca Hatch, se debe multiplicar por 10 para obtener el valor verdadero.
5. En caso el contenido de cloruros en la muestra sea bajo, utilizar viales convencionales. El método de cuantificación por viales alto rango Plus de Hatch, no es un método certificado.
6. Para acidificar la muestra, en la presente investigación se utilizaron residuos ácidos, cuyo único requerimiento fue que posean un pH menor a 2 unidades de pH; esta situación no trae un efecto negativo al tratamiento, debido a no se tiene certeza del contenido químico del lixiviado y la variación en la carga contaminante no resulta significativa. Además, que para el caso particular de Befesa, cuentan con este tipo de residuos para disposición final y podrían ser utilizados en el tratamiento sin

7. inconvenientes, lo que reduce el costo de tratamiento. Si se desea replicar el tratamiento en algún efluente líquido distinto del lixiviado, se deberá considerar el uso de algún ácido fuerte para alcanzar el pH óptimo de la reacción, lo que implica su manejo en términos de seguridad para la manipulación y almacenamiento; y el tema de costos y permisos.
8. La metodología aplicada funciona correctamente en un sistema como el depósito de seguridad, debido a que cuentan con la infraestructura y personal capacitado para la manipulación de residuos peligrosos y, con los residuos ácidos necesarios para el tratamiento; además que el lodo generado puede ser secado y directamente dispuesto en el depósito o utilizado como material para la solidificación de algún líquido peligroso a ser dispuesto en el depósito; sin causar ningún impacto al ambiente y permitiendo manejar costos bajos.
9. La metodología aplicada para el tratamiento del lixiviado resultaría óptima para efluentes ácidos de lixiviación en minería, debido a que se generan ácidos y la reacción ocurre en este medio. Es decir, se omite la acidificación de la muestra.
10. Para la realización de las diluciones se debe hacer uso de los instrumentos de laboratorio con la precisión volumétrica adecuada.
11. Para altas cargas contaminantes disueltas se deben manejar diluciones de aprox. 1 en 500 para evitar la contaminación del cromatógrafo iónico.
12. Este sistema de tratamiento puede ser replicado en cualquier industria en la que se manejen altas cargas orgánicas, el proceso de tratamiento utilizado en la presente investigación responde muy bien a efluentes líquidos con Índice de Biodegradabilidad muy altos.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MATINEZ E. C. y López G. D. *Tratamiento Químico De Contaminantes Orgánicos – El Proceso Fenton*. 2013. INGAR – Instituto de Desarrollo y Diseño; y Universidad Tecnológica Nacional. Santa fe Argentina.
2. SILVA S., Trujillo J., Aguilar L. y Hincapié M. 2009. *Tratamiento De Contaminantes Orgánicos Por Photofenton Con Luz Artificial*. Revista Ingenierías. Universidad de Medellín. Colombia.
3. CISTERNA O., Pedro y Peña D. Determinación de la relación DQO/DBO<sub>5</sub> en aguas residuales de comunas con población menor a 25000 habitantes en la VIII región. Universidad Tec. Fed. Santa María. Chile.
4. MÉNDEZ R., Pietrogiovanna J., Santos B., Sauri M., Giácoman G. y Castillo E. *Determinación De La Dosis Óptima De Reactivo Fenton En Un Tratamiento De Lixiviados Por Fenton Absorción*. 2009. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. México.
5. PÉREZ, D. 2011. Diseño y Explotación de Depósitos de Seguridad. Tesis M.Sc. Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad de la Castilla-La Mancha.
6. MENDOZA, P. y López, V. 2004. Estudio De La Calidad Del Lixiviado Del Relleno Sanitario La Esmeralda Y Su Respuesta Bajo Tratamiento En Filtro Anaerobio Piloto De Flujo Ascendente. Tesis M.Sc. Sede Manizales. Universidad Nacional de Colombia.
7. *Reducción de DBO y DOQ con Peróxido de Hidrógeno*. ELECTRO QUÍMICA MEXICACA S.A. DE C.V. Boletín Técnico. FMC.
8. SINGH, S. y Tang, W. *Statistical analysis of optimun Fenton oxidation conditions for landfill leachate treatment*. 2012. Department of Civil and Environmental Engineering, Florida International University. Miami-Usa.
9. HARO R. y ESTRADA G. *Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Tratamientos de Oxidación Avanzada*. 2014. Universidad Central de Ecuador. Facultad de Ingeniería Química – Electroquímica. Quito-Ecuador.

10. PEY J. *Aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada (Fotocatálisis Solar) Para el Tratamiento y Reutilización de Efluentes Textiles*. (2010). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera. Valencia – España.
11. MÉNDEZ R., García R., Castillo E. y Sauri M. Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. 2010. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. México.
12. Befesa Perú S.A. Tratamiento y Disposición Final de Residuos Industriales Peligrosos. Memoria Descriptiva – Planta Chilca. 2001.
13. MORILLAS A., Aguilar M., Caparrós A. y Díaz B. Muestreo en Poblaciones Finitas. OMA – España. [En línea]. Fecha de consulta: 16 de octubre del 2015. Disponible en: <http://webpersonal.uma.es/~morillas/muestreo.pdf>
14. QUIJANDRÍA S. *La Prueba de Jarras en una Planta de Tratamiento de Agua Potable*. R CHEMICAL S.A. Lima – Perú. 2012. [En línea]. Fecha de consulta: 02 de marzo del 2016. Disponible en: <http://www.r-chemical.com/la-prueba-de-jarras-en-una-planta-de-tratamiento-de-agua-potable/>
15. MANUAL DE ANÁLISIS DE AGUA. HATCH Company. Segunda edición en español. Procedimientos fotométricos para agua residual. Página 188.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Informes de Ensayo Certimín.

#### Caracterización Inicial

#### INFORME DE ENSAYO

N° ABR1148.R16

SOLICITANTE :	MARIA DEL ROSARIO ARANIBAR BIANCO
DOMICILIO LEGAL :	Av. Los Vicos N° 208 Dpto. 302Urb. La Castellana Santiago de Surco, Lima,
SOLICITADO POR :	Maria Del Rosario Aranibar Bianco
SOLICITUD DE SERVICIO AMBIENTAL:	SSA N° 305-16 Cadena de Custodia N° 844-16/CERTIMIN
REFERENCIA :	Quebrada Chutana S/N Chilca / Lima / Lima Altura Km 69.5 Panamericana Sur
FECHA DE MUESTREO :	2016/04/14
PROTOCOLO :	--
TIPO DE MUESTRA:	Agua de Proceso
NÚMERO DE MUESTRAS :	1
PRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS :	Frascos de polietileno refrigerados y sellados.
CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS : RECEPCIONADAS	Muestra en buena condición para el análisis solicitado.
FECHA DE RECEPCIÓN :	jueves, 14 de abril de 2016
IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS :	Según se indica.
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO :	2016-04-14 al 2016-04-23
FECHA DE REPORTE :	sábado, 23 de abril de 2016
PERIODO DE CUSTODIA :	Hasta un mes. De acuerdo a las recomendaciones de la metodología o norma empleada.

**SANTOS OROYA ROJAS**  
*Gerente de Laboratorios*  
CIP. 053644

Lima, 23 de abril de 2016

INFORME DE ENSAYO  
N° ABR1148.R16

RESULTADOS

Muestras			Elementos																
N°	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección LD	MDN0000 Fecha Monitoreo	MON0000 Tipo Muestra	MA0040 Cl- mg/L 1	MA0183 Turbidez NTU 1.0	MA0112 Hg (t) mg/L 0.0001	MA0122 Ag (t) mg/L 0.002	MA0122 Al (t) mg/L 0.02	MA0122 As (t) mg/L 0.008	MA0122 Ba (t) mg/L 0.001	MA0122 Be (t) mg/L 0.0003	MA0122 Bi (t) mg/L 0.02	MA0122 B (t) mg/L 0.003	MA0122 Ca (t) mg/L 0.05	MA0122 Cd (t) mg/L 0.001	MA0122 Ce (t) mg/L 0.02	MA0122 Co (t) mg/L 0.002	MA0122 Cr (t) mg/L 0.004	MA0122 Cu (t) mg/L 0.003
1	Única	2016-04-14 12:05:00	Agua de Proceso	43852	> 4000.0	0.0027	<0.002	3.38	5.351	0.547	<0.0003	<0.02	75.035	811.48	16.679	<0.02	0.389	1.521	1.024

Muestras proporcionados por el cliente.

INFORME DE ENSAYO  
N° ABR1148.R16

Muestras		Elementos																			
N°	Codigo de Servicio	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0756
	Elemento	Fe (t)	K(t)	Li (t)	Mg (t)	Mn(t)	Mo (t)	Na (t)	Ni (t)	P(t)	Pb(t)	Sb (t)	Se (t)	SiO2 (t)	Sn (t)	Sr (t)	Ti (t)	Tl (t)	V(t)	Zn (t)	DBO
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Limite de Detección LD	0.01	0.01	0.004	0.02	0.001	0.004	0.01	0.002	0.06	0.01	0.008	0.02	0.02	0.007	0.0007	0.01	0.05	0.003	0.005	2.00	
1	Única	261.79	1522.31	6.536	959.42	25.749	0.796	> 2250.00	4.647	20.36	5.20	1.103	<0.02	55.85	<0.007	5.5254	0.50	<0.05	3.264	38.934	31813.33

**INFORME DE ENSAYO**  
**N° ABR1148.R16**

Muestras		Elementos
N°	Codigo de Servicio	MA0757
	Elemento	DQO
	Unidad	mg/L
	Limite de Detección LD	10.00
1	Única	57807.00

**INFORME DE ENSAYO**  
**N° ABR1148.R16**

**CONTROL DE CALIDAD**

Muestras QC		Elementos													
N°	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección LD	MA0040 Cl- mg/L 1	MA0183 Turbidez NTU 1.0	MA0112 Hg (t) mg/L 0.0001	MA0122 Ag (t) mg/L 0.002	MA0122 Al (t) mg/L 0.02	MA0122 As (t) mg/L 0.008	MA0122 Ba (t) mg/L 0.001	MA0122 Be (t) mg/L 0.0003	MA0122 Bi (t) mg/L 0.02	MA0122 B (t) mg/L 0.003	MA0122 Ca (t) mg/L 0.05	MA0122 Cd (t) mg/L 0.001	MA0122 Ce (t) mg/L 0.02	MA0122 Co (t) mg/L 0.002
1	Adición (% Recup.)	102.0	--	105.0	100.0	102.0	98.4	100.0	98.2	<b>102.0</b>	100.2	100.0	100.0	100.0	101.2
2	Adición (% Recup.)	101.8	--	105.0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3	Adición Rango (%)	86.0 - 114.0	--	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	<b>85.0 - 115.0</b>	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	99.2	100.0	100.0	99.2	102.0	98.4	100.0	98.2	<b>102.0</b>	100.2	100.0	100.2	100.0	101.0
5	STD - Rango (%)	85.0-115.0	95.0-105.0	84.0-116.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	<b>85.0-115.0</b>	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0
6	Única (Original)	43852	> 4000.0	0.0027	<0.002	3.38	5.351	0.547	<0.0003	<b>&lt;0.02</b>	75.035	811.48	16.679	<0.02	0.389
7	Única (Dup)	43572	> 4000.0	0.0027	<0.002	3.39	5.333	0.533	<0.0003	<b>&lt;0.02</b>	73.246	791.73	16.451	<0.02	0.398
8	Blanco	<1	<1.0	<0.0001	<0.002	<0.02	<0.008	<0.001	<0.0003	<b>&lt;0.02</b>	<0.003	<0.05	<0.001	<0.02	<0.002

**INFORME DE ENSAYO**  
**N° ABR1148.R16**

Muestras QC		Elementos													
N°	Codigo de Servicio	MA0122													
	Elemento	Cr (t)	Cu (t)	Fe (t)	K (t)	Li (t)	Mg (t)	Mn (t)	Mo (t)	Na (t)	Ni (t)	P (t)	Pb (t)	Sb (t)	Se (t)
	Unidad	mg/L													
	Limite de Detección LD	0.004	0.003	0.01	0.01	0.004	0.02	0.001	0.004	0.01	0.002	0.06	0.01	0.008	0.02
1	Adición (% Recup.)	98.2	98.8	100.0	101.7	106.6	99.6	101.6	106.6	109.6	100.4	102.8	102.0	99.2	106.0
2	Adición (% Recup.)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3	Adición Rango (%)	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	98.4	98.8	100.0	101.6	106.6	99.6	101.6	106.6	102.4	100.4	102.8	100.0	99.2	106.0
5	STD - Rango (%)	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0
6	Única (Original)	1.521	1.024	261.79	1522.31	6.536	959.42	25.749	0.796	> 2250.00	4.647	20.36	5.20	1.103	<0.02
7	Única (Dup)	1.474	1.001	257.21	1492.11	6.401	941.24	25.277	0.780	> 2250.00	4.610	20.76	5.07	1.102	<0.02
8	Blanco	<0.004	<0.003	<0.01	<0.01	<0.004	<0.02	<0.001	<0.004	<0.01	<0.002	<0.06	<0.01	<0.008	<0.02

**INFORME DE ENSAYO  
N° ABR1148.R16**

Muestras QC		Elementos								
N°	Codigo de Servicio	MA0122	MA0756	MA0757						
	Elemento	SiO2 (t)	Sn (t)	Sr (t)	Ti (t)	Tl (t)	V (t)	Zn (t)	DBO	DQO
	Unidad	mg/L	mg/L	mg/L						
	Límite de Detección LD	0.02	0.007	0.0007	0.01	0.05	0.003	0.005	2.00	10.00
1	Adición (% Recup.)	108.0	99.2	100.6	100.0	98.0	100.0	101.4	--	--
2	Adición (% Recup.)	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3	Adición Rango (%)	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	--	--
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	108.0	99.2	100.6	100.0	98.0	100.0	101.4	93.8	97.2
5	STD - Rango (%)	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	84.6-115.4	80.0-120.0
6	Única (Original)	55.85	<0.007	5.5254	0.50	<0.05	3.264	38.934	31813.33	57807.00
7	Única (Dup)	54.52	<0.007	5.3563	0.49	<0.05	3.229	38.543	30933.33	57874.20
8	Blanco	<0.02	<0.007	<0.0007	<0.01	<0.05	<0.003	<0.005	<2.00	--

**INFORME DE ENSAYO**  
**N° ABR1148.R16**

**METODOS DE ENSAYO Y CODIGOS DE SERVICIO**

N°	Descripción			
	Analito	Denominación	Cod.Serv	
			(1) Norma o Referencia	
1	Cl-	Cloruro	MA0040	SMEWW 22nd Ed. 2012 Part-4500-Cl B. Pág 4-72. APHA -AWWA- WEF. Chloride Argentometric Method.
2	DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	MA0756	SMEWW 22nd Ed. 2012. Part-5210 B. Pag 5-5. APHA-AWWA-WEF. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5- Day BOD Test.
3	DQO	Demanda Química de Oxígeno	MA0757	SMEWW 22nd Ed. 2012. Part-5220 D. Pág. 5-20 APHA-AWWA-WEF. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method.
4	Turbidez	Turbidez	MA0183	SMEWW 22nd Ed. 2012. Part-2130 B. Pág 2-12. APHA-AWWA-WEF. Turbidity. Nephelometric Method.
5	Hg(t)	Mercurio total	MA0112	SMEWW 22nd Ed. 2012. Part-3112 B. Pág 3-23 . APHA- AWWA- WEF. Metals by Cold-Vapor Atomic Absorption Spectrometric Method .
6	Varios	Varios	MA0122	EPA. Method 200.7. Revisión 4.4. Determination of metals and trace elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma- Atomic. Emission Spectrometry.

(1) SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

APHA : American Public Health Association.

AWWA: American Water Works Association.

WEF : Water Environment Federation.

EPA : Environmental Protection Agency.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

ISO: International Organization for Standardization.

NTP: Norma Técnica Peruana.

NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

## Caracterización Final



### **INFORME DE ENSAYO N° JUN1356.R16**

<b>SOLICITANTE :</b>	MARIA DEL ROSARIO ARANIBAR BIANCO
<b>DOMICILIO LEGAL :</b>	Av. Los Vicus N° 208 Dpto. 302 Urb. La Castellana Santiago de Surco, Lima
<b>SOLICITADO POR :</b>	Maria Del Rosario Aranibar Bianco
<b>SOLICITUD DE SERVICIO AMBIENTAL:</b>	SSA N° 607-16 Cadena de Custodia N° 1566-16/CERTIMIN
<b>REFERENCIA :</b>	Av. La Molina S/N La Molina / Lima / Lima Universidad Nacional Agraria La Molina
<b>FECHA DE MUESTREO :</b>	2016/06/23
<b>PROTOCOLO :</b>	--
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Aguas de Lixiviación
<b>NÚMERO DE MUESTRAS :</b>	1
<b>PRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS :</b>	Frascos de polietileno y vidrio refrigerados y sellados.
<b>CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS : RECEPCIONADAS</b>	Muestra en buena condición para el análisis solicitado.
<b>FECHA DE RECEPCIÓN :</b>	Jueves, 23 de Junio de 2016
<b>IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS :</b>	Según se indica.
<b>FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO :</b>	2016-06-23 al 2016-07-03
<b>FECHA DE REPORTE :</b>	Domingo, 03 de Julio de 2016
<b>PERIODO DE CUSTODIA :</b>	Hasta un mes. De acuerdo a las recomendaciones de la metodología o norma empleada.

**SANTOS OROYA ROJAS**  
**Gerente de Laboratorios**  
**CIP. 053644**

Lima, 3 de Julio de 2016

---

\*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A.\*  
\*Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce\*. Los resultados corresponden a las muestras indicadas.



INFORME DE ENSAYO  
N° JUN1356.R16

## RESULTADOS

Muestras		Elementos																	
N°	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección LD	MON0000 Fecha Monitoreo	MON0000 Tipo Muestra	MA0458 Conductiv µS/cm	MA0040 Cl- mg/L 1	MA0183 Turbidez NTU 1.0	MA0174 STS mg/L 5	MA0002 AcyG mg/L 0.50	MA0065 DurezaTot mg CaCO3/L 1	MA0122 Ag(t) mg/L 0.002	MA0122 Al(t) mg/L 0.02	MA0122 As(t) mg/L 0.008	MA0122 Ba(t) mg/L 0.001	MA0122 Be(t) mg/L 0.0003	MA0122 Bi(t) mg/L 0.02	MA0122 B(t) mg/L 0.003	MA0122 Ca(t) mg/L 0.05	MA0122 Cd(t) mg/L 0.001	
1	1	2016-06-23 13:00	Aguas de Lixiviación	98500.0	30861	3.5	48	<0.50	2252	<0.002	0.15	0.154	0.014	<0.0003	<0.02	27.781	174.34	1.099	

Muestras proporcionadas por el cliente.

Las muestras perecibles fueron analizadas dentro de las 24 horas.



**INFORME DE ENSAYO**  
N° JUN1356.R16

Muestras		Elementos																			
N°	Codigo de Servicio	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	
	Elemento	Ce (t)	Co (t)	Cr (t)	Cu (t)	Fe (t)	K (t)	Li (t)	Mg (t)	Mn (t)	Mo (t)	Na (t)	Ni (t)	P (t)	Pb (t)	Sb (t)	Se (t)	SiO2 (t)	Sn (t)	Sr (t)	Ti (t)
	Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Limite de Detección LD	0.02	0.002	0.004	0.003	0.01	0.01	0.004	0.02	0.001	0.004	0.01	0.002	0.06	0.01	0.008	0.02	0.02	0.007	0.0007	0.01
1	1	0.03	0.122	0.247	0.031	1.20	1160.74	6.028	450.77	5.278	0.112	> 2250.00	1.949	378.83	<0.01	<0.008	<0.02	31.22	0.205	1.1345	<0.01



**INFORME DE ENSAYO**  
**N° JUN1356.R16**

Muestras		Elementos				
N°	Codigo de Servicio	MA0122	MA0122	MA0122	MA0756	MA0757
	Elemento	Tl (t)	V (t)	Zn (t)	DBO	DQO
	Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Limite de Detección LD	0.05	0.003	0.005	2.00	10.00
1	1	<0.05	0.040	0.972	883.33	12838.54



**INFORME DE ENSAYO**  
N° JUN1356.R16

**CONTROL DE CALIDAD**

Muestras QC		Elementos													
N°	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección LD	MA0458 Conductiv µS/cm	MA0040 Cl- mg/L 1	MA0183 Turbidez NTU 1.0	MA0174 STS mg/L 5	MA0002 AcyG mg/L 0.50	MA0065 DurezaTot mg CaCO3/L 1	MA0122 Ag (t) mg/L 0.002	MA0122 Al (t) mg/L 0.02	MA0122 As (t) mg/L 0.008	MA0122 Ba (t) mg/L 0.001	MA0122 Be (t) mg/L 0.0003	MA0122 Bi (t) mg/L 0.02	MA0122 B (t) mg/L 0.003	MA0122 Ca (t) mg/L 0.05
1	Adición (% Recup.)	--	100.6	--	--	101.2	91.8	96.8	96.7	103.8	96.6	93.6	<b>96.0</b>	94.8	95.5
2	Adición (% Recup.)	--	101.2	--	--	104.0	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3	Adición Rango (%)	--	86.0 - 114.0	--	--	85.0 - 115.0	89.0 - 111.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	<b>85.0 - 115.0</b>	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	100.4	98.8	100.0	100.0	106.7	98.4	94.4	96.7	103.8	96.6	93.6	<b>96.0</b>	94.8	95.3
5	STD - Rango (%)	99.0-101.0	85.0-115.0	95.0-105.0	91.0-109.0	90.0-110.0	96.0-104.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	<b>85.0-115.0</b>	85.0-115.0	85.0-115.0
6	1 (Original)	98500.0	30861	3.5	48	<0.50	2252	<0.002	0.15	0.154	0.014	<0.0003	<b>&lt;0.02</b>	27.781	174.34
7	1 (Dup)	98300.0	30836	3.5	44	<0.50	2228	<0.002	0.16	0.132	0.014	<0.0003	<b>&lt;0.02</b>	27.949	174.89
8	Blanco	--	<1	<1.0	<5	<0.50	<1	<0.002	<0.02	<0.008	<0.001	<0.0003	<b>&lt;0.02</b>	<0.003	<0.05



## AVANCE

INFORME DE ENSAYO  
N° JUN1356.R16

Muestras QC		Elementos													
N°	Codigo de Servicio	MA0122													
	Elemento	Cd (t)	Ce (t)	Co (t)	Cr (t)	Cu (t)	Fe (t)	K (t)	Li (t)	Mg (t)	Mn (t)	Mo (t)	Na (t)	Ni (t)	P (t)
	Unidad	mg/L													
	Límite de Detección LD	0.001	0.02	0.002	0.004	0.003	0.01	0.01	0.004	0.02	0.001	0.004	0.01	0.002	0.06
1	Adición (% Recup.)	97.0	98.0	98.8	100.2	95.6	96.0	98.5	98.8	95.6	95.4	99.4	97.5	98.4	100.4
2	Adición (% Recup.)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3	Adición Rango (%)	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	97.0	98.0	98.8	100.2	95.6	96.0	98.5	99.0	95.6	95.4	99.2	97.5	98.4	100.0
5	STD - Rango (%)	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0
6	1 (Original)	1.099	0.03	0.122	0.247	0.031	1.20	1160.74	6.028	450.77	5.278	0.112	> 2250.00	1.949	378.83
7	1 (Dup)	1.119	0.03	0.124	0.232	0.030	1.20	1170.36	6.069	452.53	5.304	0.122	> 2250.00	1.917	380.91
8	Blanco	<0.001	<0.02	<0.002	<0.004	<0.003	<0.01	<0.01	<0.004	<0.02	<0.001	<0.004	<0.01	<0.002	<0.06



# AVANCE

## INFORME DE ENSAYO N° JUN1356.R16

Muestras QC		Elementos												
N°	Codigo de Servicio	MA0122	MA0122	MA0756	MA0757									
	Elemento	Pb (t)	Sb (t)	Se (t)	SiO2 (t)	Sn (t)	Sr (t)	Ti (t)	Tl (t)	V (t)	Zn (t)	DBO	DQO	
	Unidad	mg/L	mg/L	mg/L										
	Limite de Detección LD	0.01	0.008	0.02	0.02	0.007	0.0007	0.01	0.05	0.003	0.005	2.00	10.00	
1	Adición (% Recup.)	100.0	99.6	100.0	99.6	101.8	97.7	98.0	98.0	97.2	97.0	--	--	
2	Adición (% Recup.)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
3	Adición Rango (%)	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	--	--	
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	100.0	99.6	100.0	99.2	101.8	97.8	98.0	98.0	97.2	97.0	93.4	105.9	
5	STD - Rango (%)	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	84.6-115.4	80.0-120.0	
6	1 (Original)	<0.01	<0.008	<0.02	31.22	0.205	1.1345	<0.01	<0.05	0.040	0.972	883.33	12838.54	
7	1 (Dup)	<0.01	<0.008	<0.02	31.50	0.201	1.1310	<0.01	<0.05	0.036	0.974	859.33	12906.12	
8	Blanco	<0.01	<0.008	<0.02	<0.02	<0.007	<0.0007	<0.01	<0.05	<0.003	<0.005	<0.20	<10.00	



# AVANCE

**INFORME DE ENSAYO**  
N° JUN1356.R16

## METODOS DE ENSAYO Y CODIGOS DE SERVICIO

N°	Descripción			
	Analito	Denominación	Cod. Serv	
			(1) Norma o Referencia	
1	AcyG	Aceites y grasas	MA0002	SMEWW 22nd Ed. 2012.Part-5520 B Pag 5-40. APHA-AWWA-WEF. Oil and Grease. Liquid-Liquid, Partition - Gravimetric Method
2	Cl-	Cloruro	MA0040	SMEWW 22nd Ed. 2012 Part-4500-Cl B. Pág 4-72.APHA -AWWA- WEF. Chloride Argentometric Method.
3	Conductiv	Conductividad	MA0458	SMEWW 22nd Ed. 2012 Part-2510 B. Pág 2-52.APHA -AWWA- WEF. Conductivity. Laboratory Method
4	DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	MA0756	SMEWW 22nd Ed. 2012.Part-5210 B. Pag 5-5. APHA-AWWA-WEF. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5- Day BOD Test.
5	DQO	Demanda Química de Oxígeno	MA0757	SMEWW 22nd Ed.2012. Part-5220 D. Pág.5-20 APHA-AWWA-WEF. Chemical Oxygen Demand (COD).Closed Reflux, Colorimetric Method.
6	DurezaTot	Dureza Total	MA0065	SMEWW 22nd Ed. 2012 Part-2340 C. Pág 2-44.APHA -AWWA- WEF. Hardness. EDTA Titrimetric Method
7	Turbidez	Turbidez	MA0183	SMEWW-APHA-AWWA-WEF. 22nd Ed. 2012. Part-2130 B.Pág 2-13. Turbidity. Nephelometric Method.
8	STS	Sólidos Totales Suspendidos	MA0174	SMEWW 22nd Ed. 2012.Part-2540 D. Pág 2-66 APHA AWWA WEF.Solids. Total Suspended Solids Dried at 103 - 105°C.
9	Varios	Varios	MA0122	EPA. Method 200.7. Revisión 4.4. Determination of metals and trace elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma- Atomic. Emission Spectrometry.

- (1) SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.  
 APHA : American Public Health Association.  
 AWWA: American Water Works Association.  
 WEF : Water Environment Federation.  
 EPA : Environmental Protection Agency.  
 ASTM: American Society for Testing and Materials.  
 ISO: International Organization for Standardization.  
 NTP: Norma Técnica Peruana.  
 NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

## Anexo 2: Proyecto de Decreto Supremo LMP para Infraestructuras de Residuos Sólidos

Apruébense los Límite Máximos Permisibles para los efluentes de la infraestructura de residuos sólidos de acuerdo a la Tabla N° 01:

**Tabla N° 01**  
**Límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de tratamiento de residuos sólidos y lixiviados de rellenos sanitarios y de seguridad**

	Parámetros	Unidad	LMP	Método de ensayo
I	Generales			
1	pH		6,5 – 8,5	APHA 4500-H+ - B Pág. 4-90 a 4-94 21ava edición

	Parámetros	Unidad	LMP	Método de ensayo
2	Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	30	APHA 2540-D Pág. 2-58 a 2-59 21ava edición
<b>II</b>	<b>Orgánicos</b>			
3	DQO	mg/L	120	EPA method 410.1 600/4-79-020 REVISED MARCH
4	DBO	mg/L	20	APHA -AWWA-WEF 5210 B. 21st edition
5	Hidrocarburos Totales de Petróleo		10	DIN EN ISO 9377-2. Julio 2001
<b>III</b>	<b>Inorgánicos</b>			
6	Amonio (como N)	mg/L	10	
7	Arsénico total	mg/L	0,1	APHA 3114-C Pág. 3-37 a 3-38 21ava edición
8	Cadmio total	mg/L	0,1	APHA 3111-B, Pág 3-17 a 3-19, 21st Edition.
9	Cobre total	mg/L	0,5	APHA 3111-B Pág. 3-17 a 3-19 21ava edición
10	Cromo VI (*)	mg/L	0,1	Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA-AWWA-WEF. 3500 Cr-B 21 st Edition
11	Hierro total	mg/L	2	APHA 3111-B Pág. 3-17 a 3-19 21ava edición
12	Mercurio total	mg/L	0,01	APHA 3112-B Pág. 3-23 a 3-24 21ava edición
13	Plomo total	mg/L	0,5	APHA 3111-B Pág. 3-17 a 3-19 21ava edición
14	Zinc total	mg/L	0,5	APHA 3111-B Pág. 3-17 a 3-19 21ava Edición
<b>IV</b>	<b>Biológico</b>			
15	Coliformes totales	NMP/100 mL	1 000	APHA 9221 B Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st Edition

(\*) En muestra no filtrada

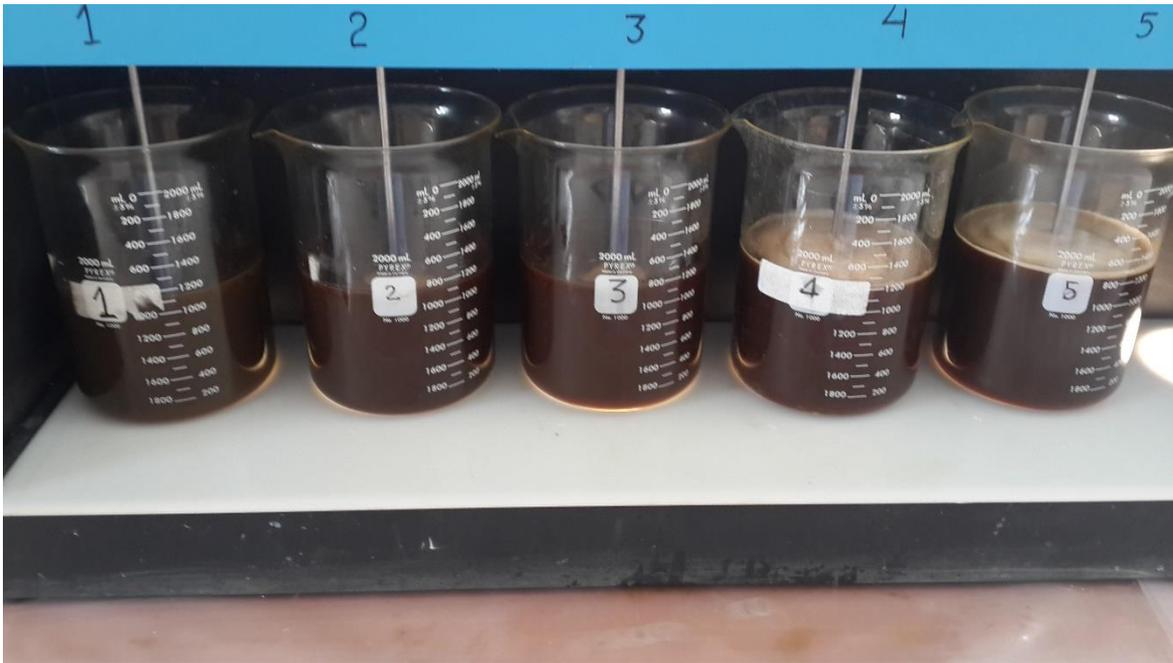
### Anexo 3: Archivo Fotográfico



Foto 1. Colecta de muestra de lixiviado. Depósito de Seguridad Befesa Perú.



**Foto 2.** Acopio de cilindros y cooler de muestras en pallet para su traslado fuera del depósito.  
Depósito de Seguridad Befesa Perú.



**Foto 3.** Equipo de test de jarras, prueba de optimización de peróxido de hidrógeno.



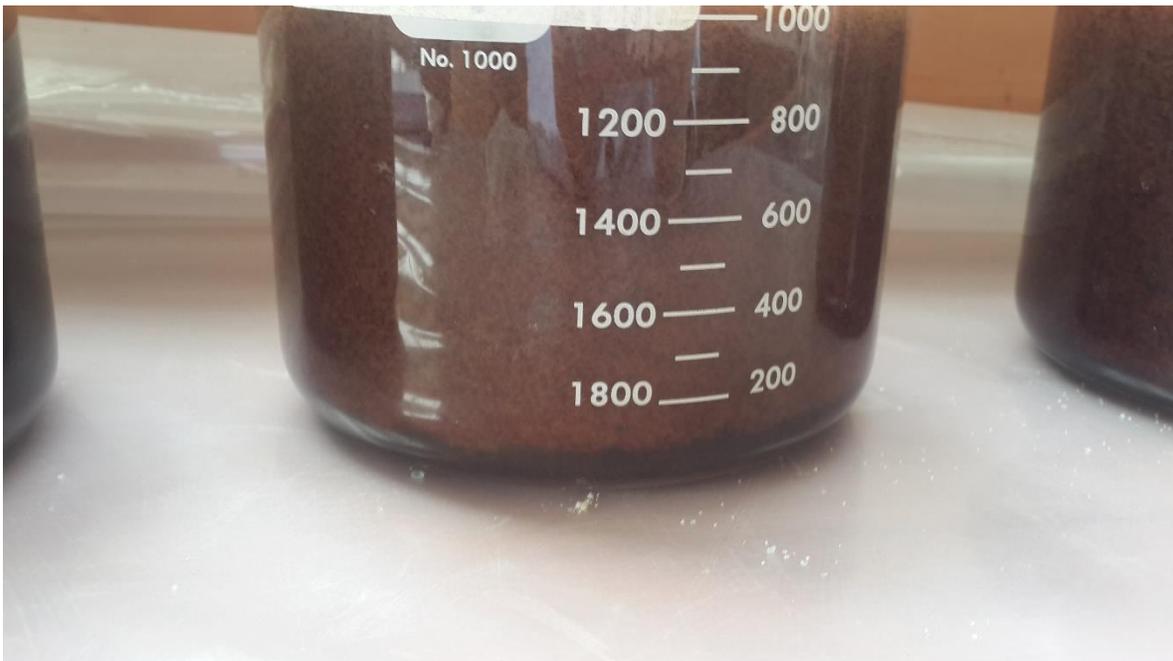
**Foto 4.** Dosificación de peróxido de hidrógeno.



**Foto 5.** Reacción violenta en jarra N° 5, la reacción de oxidación ocurre muy rápido por un exceso de peróxido de hidrógeno, produjo un incremento de temperatura, formación de espuma y burbujeo intenso.



**Foto 6.** Jarras después de concluida la prueba, se dejarán reaccionar por 24 horas.



**Foto 7.** Después de transcurridas las 24 horas de reacción se puede observar la formación de una especie de lodo voluminoso en las jarras 2,3 y 4.



**Foto 8.** Prueba 2 Optimización de Sulfato de Hierro, primera repetición. Toma de muestra para acidificación.



**Foto 9.** Vasos pequeños, muestra acidificada.



**Foto 10.** Verificación de pH, se ajustó el pH hasta el rango entre 6 y 8.



**Foto 10.** Dosificación de carbón activado y filtración de la mezcla. Se utilizó papel de filtración rápida.



Foto 11. Producto de filtración. Prueba 2 Optimización de Sulfato Ferroso. Producto de filtración.



**Foto 12.** Producto de filtración. Prueba 2 Optimización de Sulfato Ferroso, segunda repetición. Producto de filtración.



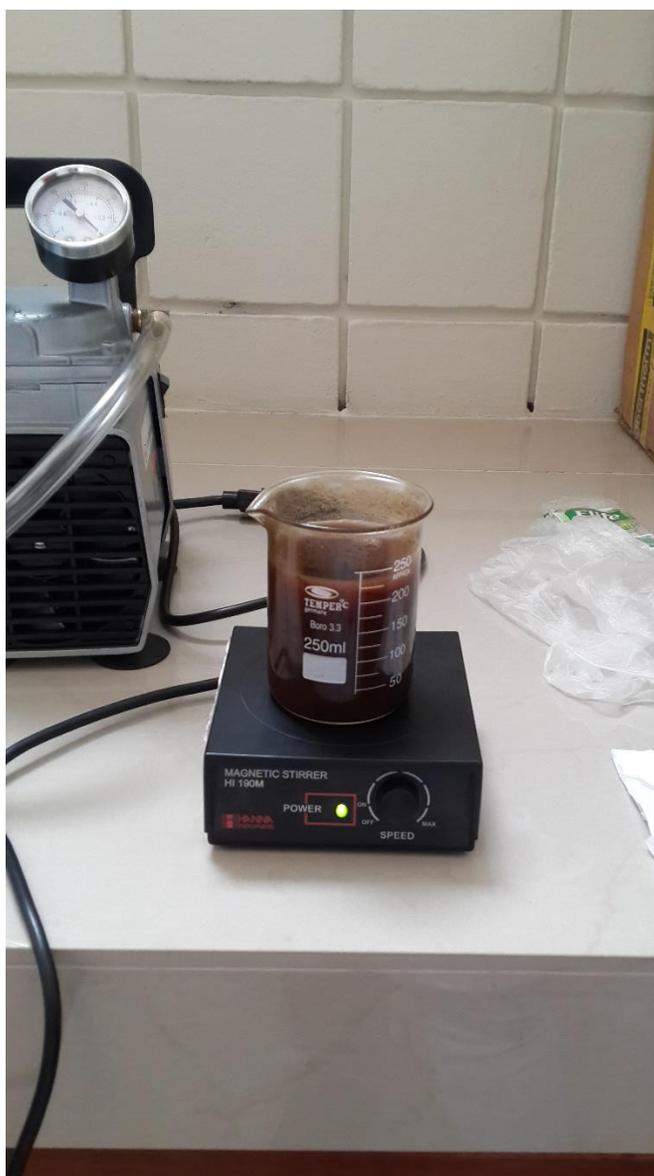
**Foto 13.** Producto de filtración. Prueba 2 Optimización de Sulfato Ferroso. Producto de filtración.



**Foto 14.** Viales Hatch después de digestión.



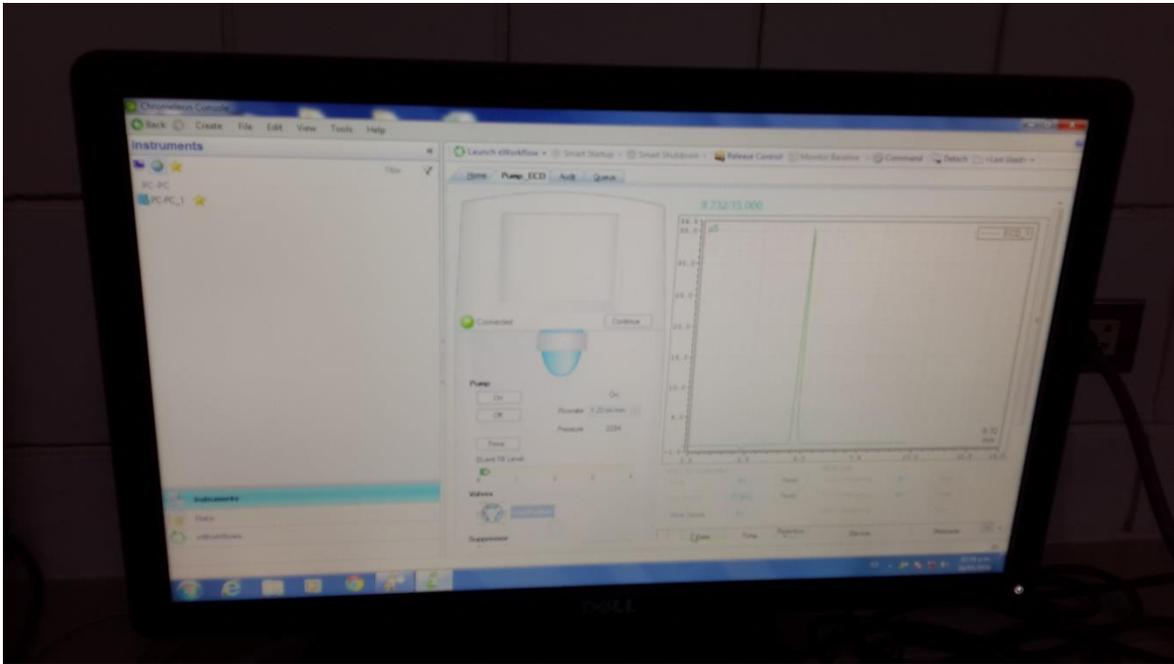
**Foto 15.** Medición de los valores reportados de los viales después de la digestión.



**Foto 16.** Preparación de muestra para prueba de cinética en Espectrofotómetro.



**Foto 17.** Medición de iones disueltos. Equipo de cromatografía iónica.



**Foto 18.** Lectura de iones disueltos devuelta por el equipo de cromatografía iónica.



**Foto 19.** Colecta de muestra tratada para realización de análisis de calidad del agua en Certimín.

## Anexo 4: Legislación Vigente de Chile para el vertimiento de lixiviado de un depósito de seguridad

### Decreto 90 establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales

4.2 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales.

TABLA Nº 1

LIMITES MAXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LIQUIDOS A CUERPOS DE AGUA FLUVIALES

Contaminantes	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permitido
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	5
Arsénico	mg/L	As	0,5
Boro	mg/L	B	0,75
Cadmio	mg/L	Cd	0,01
Cianuro	mg/L	CN-	0,20
Cloruros	mg/L	Cl-	400
Cobre Total	mg/L	Cu	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,05
DBO5	mg O2/L	DBO5	35 *
Fósforo	mg/L	P	10
Fluoruro	mg/L	F-	1,5
Hidrocarburos Fijos	mg/L	HF	10
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	5
Manganeso	mg/L	Mn	0,3
Mercurio	mg/L	Hg	0,001
Molibdeno	mg/L	Mo	1
Níquel	mg/L	Ni	0,2
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
Pentaclorofenol	mg/L	C60HC15	0,009
pH	Unidad	pH	6,0 -8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,05
Poder Espumógeno	nm	PE	7
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80 *
Sulfatos	mg/L	SO42-	1000
Sulfuros	mg/L	S2-	1
Temperatura	C°	T°	35
Tetracloroetano	mg/L	C2C14	0,04
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	0,7
Triclorometano	mg/L	CHC13	0,2
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	0,5
Zinc	mg/L	Zn	3

\* = Para los residuos líquidos provenientes de plantas de tratamientos de aguas servidas domésticas, no se considerará el contenido de algas, conforme a la metodología descrita en el punto 6.6.

## DECRETO 148: Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos

Artículo 61 El proyecto a que se refiere el artículo 44, en el caso de rellenos de seguridad deberá considerar un sistema de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas, que consulte un número suficiente de pozos instalados en sitios y profundidades adecuadas, para extraer muestras representativas del acuífero superior. Para efectos de analizar los resultados del monitoreo, previo a la puesta en marcha del relleno, se deberá hacer una completa caracterización de dichas aguas que servirá de patrón de referencia.

El número, distancia y profundidad de tales pozos deberán ser determinados en base a estudios técnicos específicos sobre el sitio, que provean una acabada caracterización del acuífero, caudal y variaciones estacionales del flujo. En todo caso, deberá existir al menos un pozo aguas arriba del relleno y uno aguas abajo de éste.

El monitoreo de las aguas subterráneas deberá entregar información sobre la concentración de todos los Parámetros señalados en el Artículo 92 del presente reglamento. En todo caso, se podrá proponer a la Autoridad Sanitaria la eliminación de alguno de tales parámetros en función de su inexistencia en los residuos depositados o de la imposibilidad de que ellos se formen a partir de éstos residuos. La frecuencia mínima del monitoreo deberá ser de una muestra por pozo cada 6 meses.

Artículo 62 Todo relleno de seguridad en que se generen líquidos lixiviados deberá cumplir con las normas vigentes sobre residuos industriales líquidos, en caso contrario deberá contemplar una planta de tratamiento de lixiviados, conectada al sistema de recolección de éstos líquidos. En caso de que la planta de tratamiento genere efluentes, éstos deberán cumplir con dichas normas. El material generado y/o removido por estas plantas, deberá ser manejado como un residuo peligroso.

Artículo 63 Se deberá mantener un registro de los residuos peligrosos depositados en el relleno de seguridad, disponible para su verificación por la Autoridad Sanitaria. Este registro será entregado a dicha Autoridad al momento del cierre de la instalación. El registro deberá contener al menos la siguiente información:

- a) Fecha de recepción, industria o lugar de procedencia y fecha de disposición.
- b) Características de peligrosidad del residuo.
- c) Cantidad, peso y volumen.
- d) Características físico-químicas.
- e) Tratamiento al que fue sometido antes de la disposición, cuando corresponda.
- f) Ubicación en la celda en que fue dispuesto.